

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**Escuela Universitaria**

**de**

**Ingeniería Técnica de Telecomunicación**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ENSAYOS ACELERADOS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS  
LED**

**JESÚS PEDRUELO BRAGADO**

**Septiembre de 2013**



E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

## PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

**TEMA:** ENSAYOS ACELERADOS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS LED

**TÍTULO:** ENSAYOS ACELERADOS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS LED

**AUTOR:** JESÚS PEDRUELO BRAGADO

**TUTOR:** EDUARDO NOGUEIRA DÍAZ

Vº Bº.

**DEPARTAMENTO:** ELECTRÓNICA FÍSICA



**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE:** INMACULADA ÁLVAREZ DE MON Y REGO

**VOCAL:** EDUARDO NOGUEIRA DÍAZ

**VOCAL SECRETARIO:** MANUEL VÁZQUEZ LÓPEZ

**DIRECTOR:**

**Fecha de lectura:** 26 SEPTIEMBRE 2013

**Calificación:**

El Secretario,

### RESUMEN DEL PROYECTO:

El objetivo del proyecto es el de determinar, a través del análisis Weibull, el tiempo de vida de dispositivos LED, y las causas de fallo de los mismos, así como un análisis de su fiabilidad en diferentes condiciones de esfuerzo.

Para ello, disponemos de una cámara climática, en la que se pueden programar condiciones específicas de temperatura y humedad que supondrán un nivel de esfuerzo adicional para los dispositivos, es decir, se intenta acelerar el fallo del LED con estos parámetros. En cada ensayo, dispondremos de 15 LED como muestra.

Se realizarán dos medidas al día con un intervalo entre ellas de, al menos, 6 horas. Se medirá tanto potencia luminosa de cada uno de los LED, como tensión y corriente para obtener las gráficas I-V (a través de un programa desarrollado en LabView) tanto dentro de la cámara, durante el proceso, como fuera de ella. Mediante esta serie de datos, podremos calcular una ecuación que relacione el tiempo de vida con las condiciones de esfuerzo del ensayo, así como la causa de fallo de cada dispositivo.

*Este proyecto se hizo de forma conjunta con Rubén Martín Muñoz, compañero que ya lo presentó hace un tiempo. En mi caso, no me ha sido posible presentarlo hasta la fecha por motivos laborales.*

*Dedicado a mis padres y a mi hermano.*



## AGRADECIMIENTOS

*Se lo agradezco en especial a mis padres, sin los cuales nada de esto sería posible, por animarme siempre a perseguir mis objetivos y a conseguir hacer realidad mis sueños.*

*A mis amigos, que siempre han estado conmigo, en los momentos alegres y en los momentos tristes, porque su apoyo ha sido fundamental para mí.*

*A los compañeros de la universidad, de todos y cada uno de vosotros he aprendido algo valioso, y me llevo, además, muchos y muy buenos de mi paso por la Universidad.*

*A los profesores, a todos en general, porque hacen de nosotros personas preparadas, nos ayudan y lo hacen con ánimo año tras año, a los del departamento de Electrónica Física, por enseñarme tantas cosas preparando este proyecto, y a Eduardo Nogueira en especial, por la paciencia, la profesionalidad y la ayuda incondicional que siempre me ha prestado.*

*Mis más sincero agradecimiento a todos vosotros, ¡gracias!*

## RESUMEN

El objetivo de este proyecto es el de determinar, a través de una serie de medidas, los tiempos de vida y causas de fallo de diodos LED. Para ello, se someterá a los dispositivos a condiciones extremas de temperatura y humedad dentro de una cámara climática, con el objetivo de acelerar su edad, su tiempo de uso, hecho que provocará la aparición de los fallos mucho antes que en condiciones normales de funcionamiento.

Se tomarán medidas tanto de su tensión y corriente para el análisis de las gráficas I-V, dentro y fuera de la cámara, como de las potencias luminosas de cada uno de ellos. Estas medidas se realizarán en dos ocasiones al día, en intervalos de no menos de 6 horas.

Para las medidas de tensión y corriente se utilizará un programa desarrollado en el entorno de LabView, tanto para las medidas en el interior de la cámara, lo que nos permite un seguimiento específico del estado de los dispositivos en cada momento, como para las medidas fuera de ella. Para las medidas de la potencia luminosa de cada LED se utilizará un medidor de potencia óptica.

Cada ensayo constará de 15 dispositivos LED, que se evaluarán en las mismas condiciones de temperatura y humedad. El resumen de los 8 ensayos realizados es el que sigue:

- Ensayo 1: 140°C 85% HUMEDAD a 10 mA.
- Ensayo 2: 140°C 70% HUMEDAD a 10 mA.
- Ensayo 3: 120°C 85% HUMEDAD a 10 mA.
- Ensayo 4: 120°C 85% HUMEDAD a 30 mA.
- Ensayo 5: 140°C 70% HUMEDAD a 30 mA.
- Ensayo 6: 140°C 85% HUMEDAD a 30 mA.
- Ensayo 7: 140°C 60% HUMEDAD a 30 mA.
- Ensayo 8: 140°C 85% HUMEDAD a 20 mA.

Una vez tomadas las medidas, se analizarán los datos, de cara a obtener una ley de degradación del LED a través del análisis de Weibull y se estudiarán las diferentes causas de fallo.

## ABSTRACT

The aim of this Project is to determine, based on several measures, the lifetime and the causes of LED's failures. The devices will be tested under extreme both temperature and humidity conditions in a Pressure Cooker, attempting to make faults to appear earlier.

Voltage and current measures will be taken, inside and also outside the Pressure cooker, in order to use them in I-V graphs. In addition, luminous power measures for each LED will be taken. All those measures will be obtained twice a day, with 6 hours delay between both of them.

A program based on LabView environment will be used to take voltage and current measures, inside and outside the pressure cooker, which allow us to follow the performance of the LED at each moment. The luminous power of each LED will be taken by a measurer.

Each test consists of 15 LED devices, which will be evaluated under the same conditions each time. The 8 tests are as follows

- Test 1: 140°C 85% relative humidity at 10 mA.
- Test 2: 140°C 70% relative humidity at 10 mA.
- Test 3: 120°C 85% relative humidity at 10 mA.
- Test 4: 120°C 85% relative humidity at 30 mA.
- Test 5: 140°C 70% relative humidity at 30 mA.
- Test 6: 140°C 85% relative humidity at 30 mA.
- Test 7: 140°C 60% relative humidity at 30 mA.
- Test 8: 140°C 85% relative humidity at 20 mA.

When the measures are completely taken, data will be analyzed, in order to obtain a LED's degradation law using Weibull's distribution. Also the causes of the failures will be evaluated.

# ÍNDICE

## EL DIODO LED

1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS LED	16
1.2.1 TEORÍA DE BANDAS	17
1.3 ELEMENTOS DE UN LED	19
1.4 TIPOS DE LED	20
1.4.1 DIODOS DE BAJA INTENSIDAD	21
1.4.2 DIODOS DE ALTA INTENSIDAD	23
1.5 COLORES Y MATERIALES DE LOS LED	25
1.6 CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS	27
1.6.1 EFICIENCIAS	27
1.6.1.1 EFICIENCIA INTERNA	27
1.6.1.2 EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN	28
1.6.1.3 EFICIENCIA CUÁNTICA EXTERNA	28
1.6.1.4 EFICIENCIA DE POTENCIA	29
1.6.2 ENCAPSULADOS EPOXY PARA LED	29
1.6.3 DEPENDENCIA TEMPERATURA – INTENSIDAD	30
1.7 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS LED	32
1.7.1 CURVA I-V DEL DIODO	32
1.7.2 DESVIACIONES DE LA TRAYECTORIA IDEAL DE I-V	39
1.7.3 ESTUDIO DE LAS RESISTENCIAS PARÁSITAS DEL DIODO	45
1.7.4 ENERGÍA DE EMISIÓN	47
1.7.5 DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN HOMOUNIONES PN	48
1.7.6 DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN HETEROUNIONES PN	51
1.7.7 EFECTO DE UNIONES HETEROGÉNEAS EN DISPOSITIVOS RESISTIVOS	53
1.7.8 PÉRDIDAS DE PORTADORES EN HETEROESTRUCTURAS DOBLES	58
1.7.9 DESBORDAMIENTO EN HETEROESTRUCTURAS DOBLES	61
1.7.10 CAPAS BLOQUEANTES DE ELECTRONES	66
1.7.11 TENSIÓN DEL DIODO	68
2. ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS	70
2.1 INTRODUCCIÓN	70
2.2 TIPOS DE ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS	71
2.2.1 ENSAYOS DE VIDA CUALITATIVOS	71

2.2.2	ENSAYOS DE VIDA CUANTITATIVOS	72
2.2.2.1	ACELERACIÓN DE USO	73
2.2.2.2	ACELERACIÓN DE SOBRESFUERZO	74
2.2.2.3	ESFUERZOS Y NIVELES DE ESFUERZO	74
2.2.3	ANÁLISIS DE DATOS DE ENSAYOS DE VIDA CUANTITATIVOS	75
2.2.3.1	ENSAYOS ACELERADOS CON ESFUERZO CONSTANTE	76
2.2.3.2	DISTRIBUCIONES DE VIDA Y MODELOS DE ESFUERZO	79
2.2.3.3	MÉTODO DE ANÁLISIS	81
2.2.3.3.1	SELECCIONAR UNA DISTRIBUCIÓN DE VIDA	81
2.2.3.3.2	SELECCIONAR RELACIÓN ESFUERZO – VIDA	81
2.2.3.3.3	APROXIMACIÓN DE PARÁMETROS	82
2.2.3.3.4	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE FIABILIDAD	83
2.2.3.4	CARGAS DE ESFUERZO	83
2.2.3.4.1	ESFUERZO INDEPENDIENTE DEL TIEMPO	84
2.2.3.4.2	ESFUERZO DEPENDIENTE DEL TIEMPO	85
2.2.3.5	DISTRIBUCIONES DE VIDA	86
2.2.3.5.1	MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD	87
2.2.3.5.2	DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL	90
2.2.3.5.3	DISTRIBUCIÓN WEIBULL	93
2.2.3.5.4	DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL	95
2.2.3.6	RELACIÓN DE ARRHENIUS	97
2.2.3.6.1	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y PARÁMETRO B	101
2.2.3.6.2	FACTOR DE ACELERACIÓN DE AHRRENIUS	102
2.2.3.6.3	MODELO DE AHRRENIUS EXPONENCIAL	103
2.2.3.6.4	MODELO DE AHRRENIUS WEIBULL	107
2.2.3.6.5	MODELO DE AHRRENIUS LOGNORMAL	116
2.2.3.7	RELACIÓN DE EYRING	122
2.2.3.7.1	FACTOR DE ACELERACIÓN	124
2.2.3.8	LEY DE POTENCIA INVERSA	125
2.2.3.8.1	FACTOR DE ACELERACIÓN	127
2.2.3.8.2	MÉTODO DE POTENCIA INVERSA LOGNORMAL	128
2.2.3.8.3	MÉTODO DE POTENCIA INVERSA WEIBULL	128
2.2.3.8.4	MÉTODO DE POTENCIA INVERSA EXPONENCIAL	130
2.2.3.8.5	MÉTODO DE POTENCIA INVERSA Y COFFIN MASON	130
2.2.3.9	RELACIÓN TEMPERATURA HUMEDAD	132
2.2.3.9.1	FACTOR DE ACELERACIÓN	134
2.2.3.9.2	RELACIÓN TH – EXPONENCIAL	135
2.2.3.9.3	RELACIÓN TH – WEIBULL	137

2.2.3.9.4	RELACIÓN TH – LOGNORMAL	139
3.	MÉTODO DE TRABAJO EN LABORATORIO	143
3.1	EQUIPAMIENTO LABORATORIO HW	143
3.1.1	CÁMARA CLIMÁTICA	143
3.1.2	FUENTE ALIMENTACIÓN	144
3.1.3	MEDIDOR LUMÍNICO	145
3.1.4	MULTÍMETRO	145
3.1.5	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	147
3.1.6	CÁMARA FOTOGRÁFICA	149
3.2	EQUIPAMIENTO LABORATORIO SW	151
3.2.1	SISTEMA GPIB	151
3.2.2	ESQUEMA SISTEMA GPIB	152
3.2.3	CONTROLADOR GPIB HS HUB	154
4.	DESARROLLO DE LOS ENSAYOS Y TOMA DE MUESTRAS	157
4.1	MUESTRAS	157
4.2	HOJA DE CARACTERÍSTICAS	158
4.3	DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	159
4.4	MEDIDA DE POTENCIA LUMINOSA	159
4.5	GRÁFICAS I – V	160
4.6	MEDIDAS EN LA CÁMARA CLIMÁTICA	161
4.7	ANÁLISIS DE ENSAYOS	162
5.	ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	163
5.1	CONCEPTO DE FIABILIDAD	163
5.2	TIPOS DE FALLOS	164
5.3	RESUMEN DE ENSAYOS REALIZADOS	165
5.3.1	ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA	166
5.3.2	ENSAYO 140 °C Y 70% HUMEDAD RELATIVA A 10mA	189
5.3.3	ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA	213
5.3.4	ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA	236
5.3.5	ENSAYO 140 °C Y 70% HUMEDAD RELATIVA A 30mA	260
5.3.6	ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA	283
5.3.7	ENSAYO 140 °C Y 60% HUMEDAD RELATIVA A 30mA	308
5.3.8	ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 20mA	332
5.4	ANÁLISIS WEIBULL	349
5.4.1	ANÁLISIS EN HUMEDAD	349
5.4.1.1	FACTOR DE ACELERACIÓN DE HUMEDAD	350
5.4.2	ANÁLISIS EN TEMPERATURA	351
5.4.2.1	FACTOR DE ACELERACIÓN DE TEMPERATURA	352



5.4.3	ANÁLISIS EN CORRIENTE	353
5.4.3.1	FACTOR DE ACELERACIÓN DE CORRIENTE	354
6.	CONCLUSIONES	355
7.	BIBLIOGRAFÍA	357
8.	ANEXOS	359
8.1	PONENCIA CONGRESO VALENCIA	359
8.2	TABLAS MEDIDAS POTENCIA LUMINOSA	373

# 1. EL DIODO LED

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El LED (Light Emitting Diode) es un dispositivo semiconductor que emite luz. En un principio sólo emitían luz roja, pero en la actualidad emiten luz de alto brillo en el espectro infrarrojo, visible y ultravioleta. Cuando un LED se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto es llamado electroluminiscencia y el color de la luz se determina a partir de la banda de energía del semiconductor (*bandgap*).

El primer LED fue desarrollado en 1927 por Oleg Vladimirovich Losev, sin embargo no se usó en la industria hasta los años sesenta. Solo se podían construir de color rojo, verde y amarillo con poca intensidad de luz y limitaba su utilización a controles remotos y electrodomésticos para marcar el encendido y apagado. A finales del siglo XX se inventaron los LED ultravioletas y azules, lo que dio paso al desarrollo del LED blanco.

Los LED presentan muchas ventajas sobre otras fuentes de luz de incandescencia, como un consumo de energía mucho menor, mayor tiempo de vida, tamaño más pequeño, gran durabilidad y fiabilidad. Actualmente, estos diodos se usan en aplicaciones tan diversas como iluminación de aviación, iluminación automotriz, así como en las señales de tráfico. Sus características ventajosas frente a otras fuentes en cuanto a fiabilidad y rapidez de encendido, han posibilitado la aparición del LED en el desarrollo y construcción de nuevas pantallas de texto y vídeo, mientras que sus altas frecuencias de operación son también útiles en comunicaciones. También está muy extendido la utilización de los LED infrarrojos en el control remoto de TV y otros aparatos de ámbito doméstico.

A continuación, vamos a nombrar algunos ejemplos del uso del LED en la actualidad.

Una de los primeros LED utilizado fue el infrarrojo. Como hechos dicho antes, sobre todo en unidades de control remoto, como mandos de TV o aparatos de música. También se ha utilizado en métodos de transferencia de datos como mecanismos receptores, aunque con la llegada de otro tipo de tecnologías esta aplicación está casi en desuso.

Otra aplicación muy importante es en paneles informativos (en forma de unidades de *display*) y en pantallas de cristal líquido, ya sean de teléfonos móviles, agendas o calculadoras.

Quizá uno de los usos más recientes en nuestro país es en señales de tráfico debido a sus grandes ventajas frente a las anteriores fuentes como la lámpara incandescente o fluorescente, como son el ahorro energético, menor disipación de energía o la respuesta rápida. También son utilizados para iluminación pública, hecho en desarrollo progresivo, ya que supone una gran inversión, pero que implica una gran rentabilidad a largo plazo.



**Ejemplo de semáforo de tráfico de LED**  
(<http://archivo.devotodigital.com.ar>)

Existe otra aplicación para los LED, pero con una tendencia a desaparecer, que es la de receptor en sistemas de recepción de datos por fibra óptica. En la actualidad

se sustituyen casi en la mayoría de las ocasiones por LASER, con un ancho espectral menor y un amplio rango de frecuencia de modulación.

Como última aplicación podemos nombrar las pantallas de LED de TV, formadas por diodos rojos, verdes y azules según la arquitectura RGB, consiguiendo gran contraste del color, alto brillo y resistencia a impactos.



LED de diferentes colores

(<http://www.respuestario.com>)

## 1.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS LED

Estamos hablando de emisión de luz por parte de un semiconductor pero, ¿de dónde surge la luz? ¿qué fenómeno se da en el material para que emita luz de diferentes frecuencias y, por tanto, de varios colores correspondientes a longitudes de onda de todo el espectro? Vamos a tratar de explicar de forma general este proceso.

Los diodos están formados por dos tipos de material diferente, tipo p y tipo n de los que hablaremos más adelante. Cuando polarizamos en directa un diodo, como muestra la figura, según la teoría de bandas, los electrones son capaces de excitarse y pasar la banda que separa las dos regiones, P y N. Esto implica que escapan del material en forma de fotones que producen luz. El tipo de luz depende de la frecuencia del fotón. Esta frecuencia depende de la anchura de la banda de energía del material (*gap*). Mayor salto de energía en la banda, mayor frecuencia. Es lo que da lugar a cambios en la escala cromática y que emitan luz de diferentes colores.

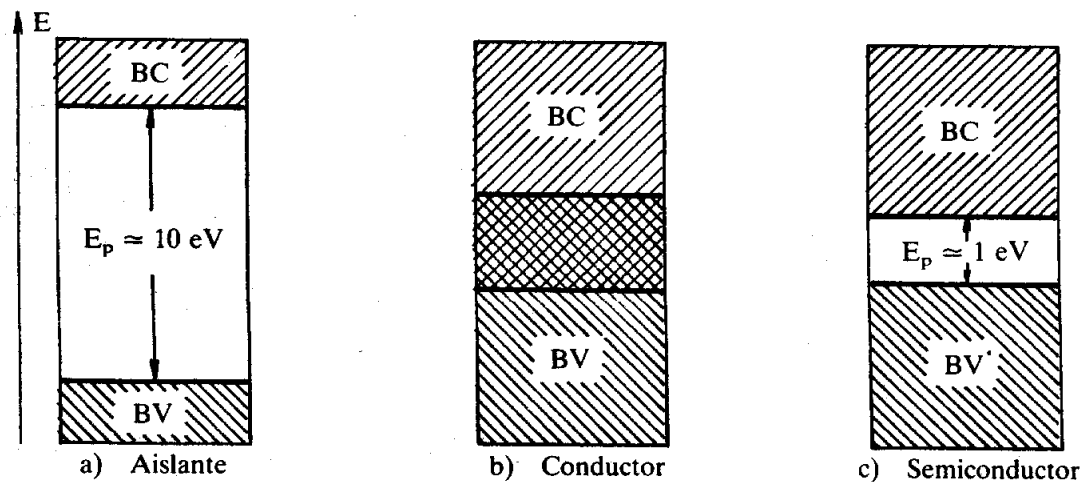
### 1.2.1 TEORÍA DE BANDAS

Cuando una gran cantidad de átomos se unen, como en las estructuras sólidas, el número de orbitales de valencia (los niveles de energía más altos) es tan grande y la diferencia de energía entre cada uno de ellos tan pequeña que se puede considerar como si los niveles de energía conjunta formaran bandas continuas más que niveles de energía como ocurre en los átomos aislados. Sin embargo, debido a que algunos intervalos de energía no contienen orbitales, independiente del número de átomos agregados, se crean ciertas brechas energéticas entre las diferentes bandas.

Estas bandas de energía sólo podrán ser superadas en el caso en que sea comunicada la energía suficiente al material.

Las bandas que existen la banda de conducción (BC) en la que se encuentran los electrones libres, los que conducen la corriente eléctrica, y la banda de valencia (BV), compuesta por electrones de valencia de los átomos, formando los enlaces entre ellos. Estos electrones no intervienen en la conducción a menos que se le aplique la energía suficiente para saltar a la banda de conducción.

La banda energética que existe entre estas dos bandas se denomina banda prohibida o *gap*, y de su valor energético, separación entre bandas en la figura, depende si un material es más aislante o conductor.

Ejemplo de tipos de materiales en función del valor de la  $E_p$ 

(http://www.iearobotics.com)

En los materiales aislantes, el *gap* es una zona de gran energía de *gap*, es decir, la separación entre bandas es muy grande, y no es posible para un electrón saltar esta zona y llegar a la otra banda. En los materiales conductores, podemos ver que las bandas están, prácticamente solapadas en la mayoría de los casos y, por tanto, el paso de electrones de una banda a otra es muy sencillo, la conducción es posible. Existe un caso intermedio, y es el de los semiconductores que, además, es el que nos ocupa. En los semiconductores, la banda prohibida tiene una separación que no es insalvable para los electrones de la banda de valencia, que pueden saltar entre bandas. A veces sólo son algunos, este hecho dependerá de varios factores como que el material se encuentre a altas presiones, a una temperatura elevada (inyección de energía) o se le añadan impurezas. Este salto de electrones provoca un defecto de carga negativa en la banda de valencia (un hueco) y un exceso en la banda a la que salta (electrón).

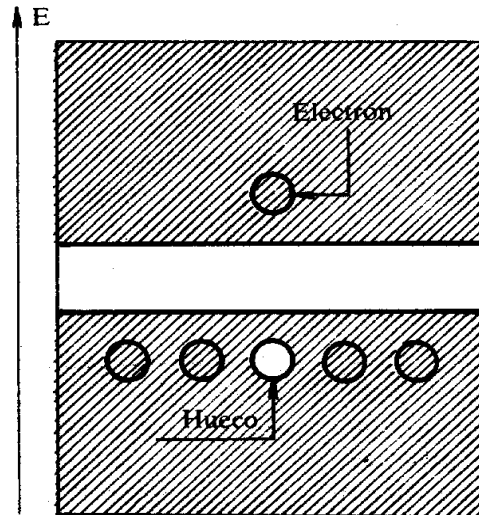
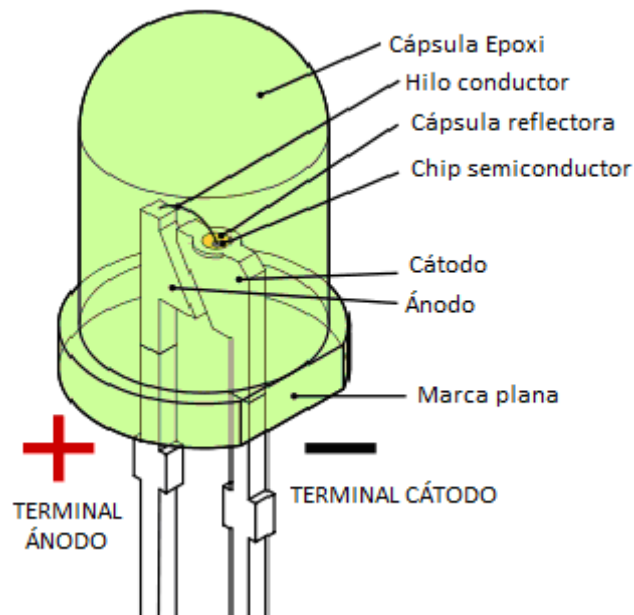


Figura sencilla para explicar el fundamento de la teoría de bandas  
(<http://www.iearobotics.com>)

### 1.3 ELEMENTOS DE UN LED

- Terminales. Ánodo, positivo y cátodo, negativo. Conducen las cargas positivas y negativas y están hechos de cobre.
- Encapsulado epoxi, ayuda a formar el haz de emisión y a proteger los elementos internos del LED.
- Hilo de oro, comunica los dos terminales y es extremadamente delgado.
- Chip semiconductor del LED, contiene el material semiconductor encargado de dar lugar a la emisión de luz
- Cátodo con reflector, sirve para proyectar la luz emitida desde el chip hacia fuera, para que no quede atrapada en la estructura interior y salga la mayor cantidad posible.
- Marca plana que indica el lado del cátodo, para identificar rápidamente cada Terminal del LED.

A continuación tenemos una figura que nos muestra la estructura de un LED a simple vista:



Elementos de un LED  
(<http://www.wikipedia.org>)

#### 1.4 TIPOS DE LED

La estructura de los LED es muy parecida, sea cual sea su cometido o características.

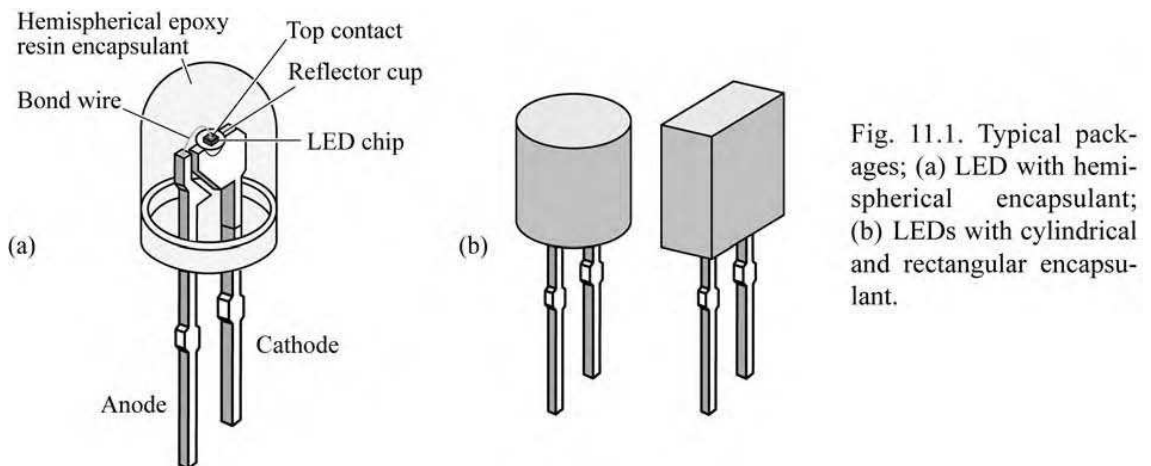
Podemos centrarnos en dos clases de LED diferenciados por su potencia. Están los de Baja Intensidad y los de Alta Intensidad. Las diferencias básicas están en el encapsulado y los materiales de determinados componentes internos de cada LED.

En principio, todos los LED están implementados sobre un encapsulado que les otorga dos ventajas fundamentales, una ventana óptica transparente para la salida de la luz y, en los de Alta Intensidad, un mecanismo de disipación del calor. El encapsulado posee una alta transparencia, un alto índice de refracción, alta estabilidad a altas temperaturas y una gran hermeticidad frente al exterior. El cambio de índice de refracción entre el semiconductor y el aire se reduce introduciendo un material en el encapsulado, aumentando así la extracción de la luz.



#### 1.4.1 DIODOS DE BAJA INTENSIDAD

La siguiente figura muestra dos ejemplos típicos de modelos de encapsulado de Baja Intensidad.



**Ejemplo de elementos de un LED y diferentes formas**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Normalmente estos modelos corresponden con el tipo de encapsulado de Baja Intensidad comúnmente denominado de 5mm o encapsulado T1 ¾.

En los LED de Baja Intensidad, el encapsulado suele ser de forma hemisférica en la mayoría de las ocasiones, pero esto depende del grado de reflexión que se pretenda con cada modelo. Por ejemplo, los LED ovals proyectan la luz de forma ovalada, no circular, con lo que son muy útiles a la hora de integrarlos en pantallas de LED o aplicaciones de este tipo. Sea cual sea el modelo, estos LED son baratos y fáciles de montar en casi cualquier aparato luminoso, además de tener unas buenas prestaciones en relación con el precio y el ciclo de vida y escasa generación de calor.

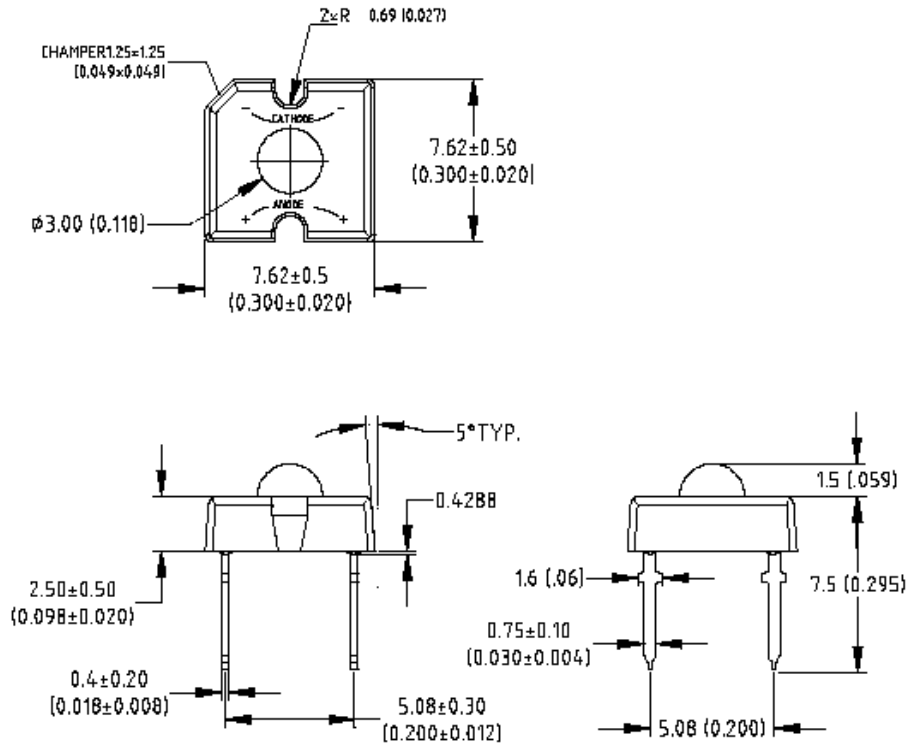


**Ejemplo de un LED oval**  
**(<http://www.tecnyo.com>)**

Arriba vemos un ejemplo de LED oval, cuyo encapsulado es totalmente ovalado.

Existe otro modelo interesante de nombrar que es el Diodo Superflux. Este modelo proporciona una mayor intensidad de luz comparándolo con el anterior. Esto es debido básicamente a que en su estructura incorporan dos terminales de plomo que reducen la resistencia térmica y a que la superficie del chip es algo mayor que el en de 5mm.

La figura siguiente nos muestra un ejemplo de diodo Superflux. Cabe destacar su curiosa estructura cuadrada, aunque podemos observar que su encapsulado es hemisférico como en los anteriores que hemos visto.



**Medidas de un diodo Superflux**

([www.opto-electronics.com.cn](http://www.opto-electronics.com.cn))

#### 1.4.2 DIODOS DE ALTA INTENSIDAD

Se utilizan para iluminar objetos ó, debido a su elevada intensidad luminosa, se utilizan como fuentes de luz concentrada.

Estos LED emplean una gran base de metal para disipar el calor, con los terminales eléctricos aislados térmicamente. Esta estructura mejora enormemente la disipación de calor, permitiendo un chip de mayor tamaño y una corriente de trabajo mas elevada.

El encapsulado suele estar fabricado de silicona, que conserva las propiedades frente a cambios de temperatura bruscos, además, está recubierto a su vez por una cubierta de plástico, que sirve como lente.

Por último, habitualmente el chip está montado sobre una capa de Si que ayuda a evitar las ESD (*electrostatic discharge protection*) protección frente a descargas electrostáticas. Estas descargas se basan en una transferencia de carga entre cuerpos con una diferencia de potencial muy grande debida a la electricidad estática, y puede dañar el componente de forma catastrófica, hecho no aconsejable cuando tenemos, por ejemplo, muchos LED conectados en serie en algún dispositivo.

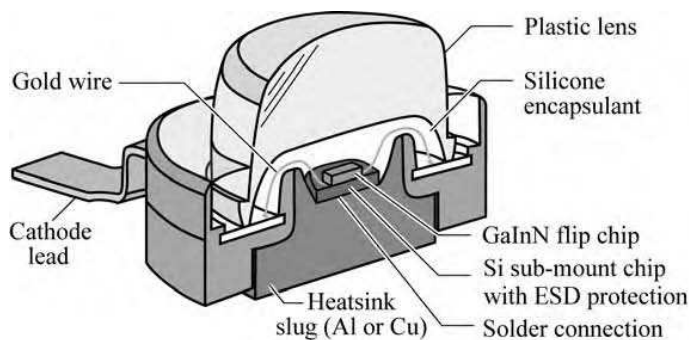
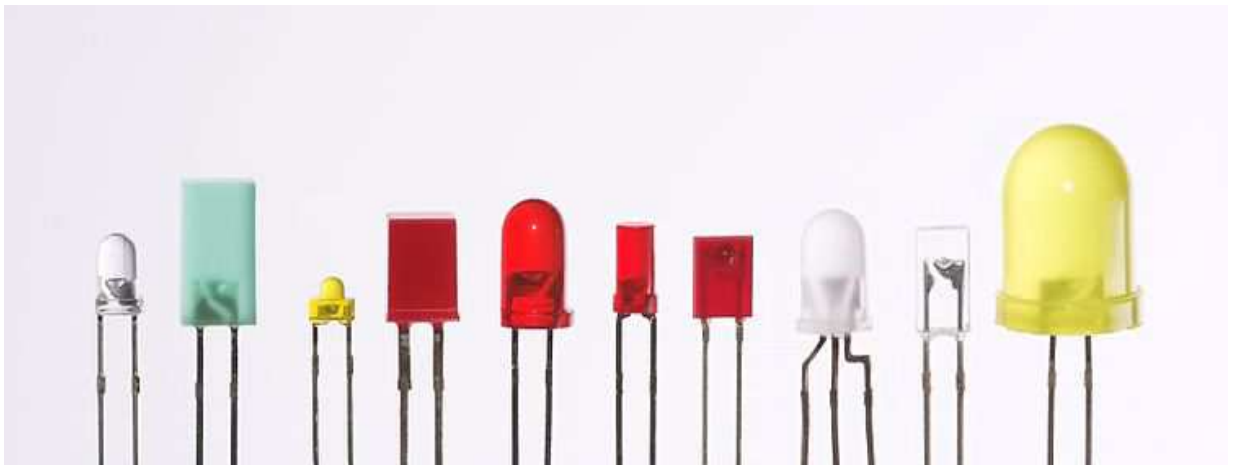


Fig. 11.3. Cross section through high-power package. The heatsink slug can be soldered to a printed circuit board for efficient heat removal. This package, called the *Barracuda package*, was introduced by Lumileds Corp. (adapted from Krames, 2003).

#### Sección transversal de un LED (Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

La figura anterior nos muestra un corte de un diodo de este tipo.

Aquí podemos ver una amplia gama de tipos y formas de LED diferentes:

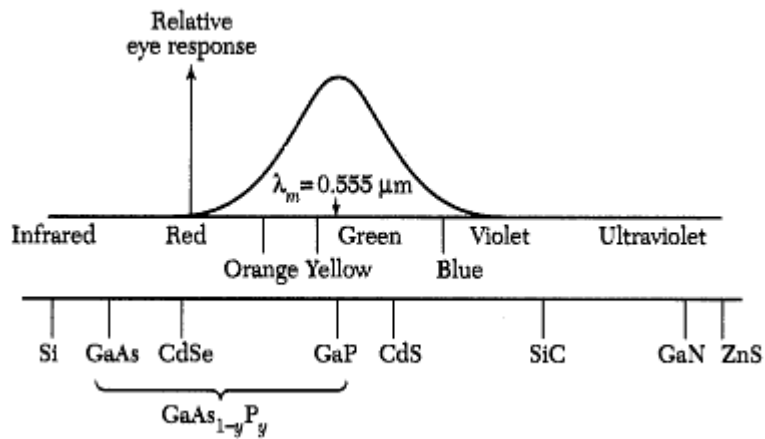


#### Gama de clases y colores de LED ([www.ofiled.com](http://www.ofiled.com))

### 1.5 COLORES Y MATERIALES DE LOS LED

Como hemos estado viendo los LED emiten radiación de diferentes longitudes de onda (zonas infrarroja, visible y ultravioleta del espectro) lo que nos permite conseguir colores muy diversos en función del cometido que tenga cada componente.

De las tres zonas del espectro mencionadas antes, nosotros sólo podemos percibir de forma natural las longitudes de onda comprendidas en la zona visible del espectro. En el siguiente gráfico podemos ver la respuesta del ojo humano a diferentes longitudes de onda en forma de colores y los compuestos del encapsulado.



**Rango de longitudes de onda de materiales comunes. Se incluye la respuesta del ojo humano  
(Semiconductor Devices Physics and Technology, S.M.Sze)**

El rango de longitudes de onda del espectro visible está entre 0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ . En la tabla de más abajo vemos una relación detallada de los compuestos más utilizados para la fabricación de encapsulados de LED y sus longitudes de onda:

Material	Wavelength (nm)
InAsSbP/InAs	4200
InAs	3800
GaInAsP/GaSb	2000
GaSb	1800
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$	1100-1600
$\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$	1550
$\text{Ga}_{0.27}\text{In}_{0.73}\text{As}_{0.63}\text{P}_{0.37}$	1300
GaAs:Er,InP:Er	1540
Si:C	1300
GaAs:Yb,InP:Yb	1000
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As:Si}$	650-940
GaAs:Si	940
$\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As:Si}$	830
$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Si}$	650
$\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$	660
$\text{GaAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}$	620
$\text{GaAs}_{0.15}\text{P}_{0.85}$	590
$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	655
GaP	690
GaP:N	550-570
$\text{GaIn}_{1-x}\text{N}$	340,430,590
SiC	400-460
BN	260,310,490

**Materiales más comunes en la fabricación de LED y sus longitudes de onda**  
(Semiconductor Devices Physics and Technology, S.M.Sze)

Aunque en esta tabla podemos ver una gran cantidad de materiales para la fabricación de componentes de este tipo, los materiales más comunes para efectos prácticos son el GaAsP, GaInN. A continuación se detallan algunas características de la composición de cada LED para algunos colores a modo de ejemplo.

LED Rojos, están formados por GaAsP, consisten en una capa p obtenida por difusión de Zn durante el crecimiento de un cristal n de GaAsP, formado en un sustrato de GaAs, por el método de crecimiento epitaxial en fase gaseosa.

LED naranjas y amarillos, están compuestos de GaAsP al igual que los rojos pero en este caso para conseguir luz anaranjada y amarilla, así como luz de longitud de onda más pequeña, lo que hacemos es ampliar el ancho de la "banda prohibida" mediante el

aumento de fósforo en el semiconductor. Su fabricación es la misma que se utiliza para los diodos rojos, por crecimiento epitaxial del cristal en fase gaseosa, la formación de la unión p-n se realiza por difusión de Zn.

LED verdes, formados por GaP, se utiliza el método de crecimiento epitaxial del cristal en fase líquida para formar la unión p-n. Al igual que los LED amarillos, también se utiliza una trampa isoelectrónica de nitrógeno para mejorar el rendimiento. Debido a que este tipo de LED posee una baja probabilidad de transición fotónica, es importante mejorar la cristalinidad de la capa n. La disminución de impurezas a larga la vida de los portadores, mejorando la cristalinidad.

Como vemos, en todos ellos se trata de un compuesto con impurezas y tratamientos especiales de los materiales a la hora de fabricar encapsulados. Esto se hace para conseguir eficiencias mayores de funcionamiento, de las que hablaremos más adelante, y en muchos sitios se denomina dopado.

## **1.6 CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS**

### 1.6.1 EFICIENCIAS

En cuanto a las características ópticas de los LED, podemos diferenciar varios parámetros en cuanto a eficiencia que nos dan una idea de cuan ideal o no es un dispositivo de este tipo, y de qué comportamiento podemos sospechar de un LED.

#### 1.6.1.1 Eficiencia interna

Eficiencia Interna: La región activa de un LED ideal, emite un fotón por cada electrón que se inyecta, es decir, cada carga produce un fotón de luz y la eficiencia de inyección es del 100%. Por este motivo, para calibrar el comportamiento real de un dispositivo LED, existe un parámetro llamado eficiencia interna que se define como

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{number of photons emitted from active region per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P_{\text{int}} / (h\nu)}{I / e}$$

donde  $P_{\text{int}}$  es la potencia óptica emitida en la región activa y  $I$  es la corriente de inyección.

#### 1.6.1.2 Eficiencia de extracción

Eficiencia de extracción: En un LED ideal, todos los fotones generados son transportados al exterior, es decir, se transporta toda la luz que genera el LED. En los LED reales, una parte de los fotones generados son absorbidos por los substratos de los materiales de los que está formado el LED, o por algún contacto metálico después de incidir contra él, o simplemente por reflexión, o bien en la parte del chip o bien en la superficie de separación con el exterior. Para definir este comportamiento en un LED real, existe la eficiencia de extracción, que se define como

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of photons emitted from active region per second}} = \frac{P / (h\nu)}{P_{\text{int}} / (h\nu)}$$

donde  $P$  es la potencia óptica emitida al espacio libre.

La eficiencia de extracción hace que sea complicado conseguir altos rendimientos en los LED, ya que, sin aplicar costosos métodos de fabricación de los dispositivos, es muy difícil superar una eficiencia de un 0,5.

#### 1.6.1.3 Eficiencia cuántica externa

Eficiencia cuántica externa: relaciona las dos eficiencias anteriores y refleja la proporción de partículas útiles con el número de partículas inyectadas, es decir, fotones de luz que salen del dispositivo y electrones que se inyectan en la región activa del mismo.



$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P/(h\nu)}{I/e} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}}$$

#### 1.6.1.4 Eficiencia de potencia

Eficiencia de potencia: relaciona la potencia inyectada al dispositivo, y se define como

$$\eta_{\text{power}} = \frac{P}{IV}$$

#### 1.6.2 ENCAPSULADOS EPOXY PARA LED

La eficiencia de extracción de luz puede mejorarse dotando al dispositivo de una forma ovalada, con un índice de refracción elevado. Como resultado del encapsulado de este tipo, el ángulo interno de reflexión total se incrementa. Conociendo las relaciones entre las potencias que se manejan dentro del encapsulado y los ángulos, podemos obtener la relación con y sin encapsulado epoxy

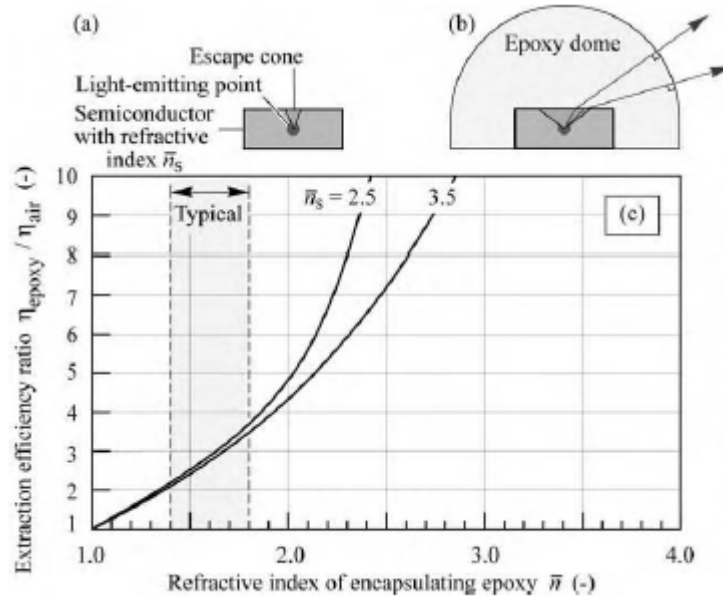
$$\frac{\eta_{\text{epoxy}}}{\eta_{\text{air}}} = \frac{1 - \cos \phi_{c,\text{epoxy}}}{1 - \cos \phi_{c,\text{air}}}$$

donde  $\phi_{c,\text{epoxy}}$  y  $\phi_{c,\text{air}}$  son los ángulos críticos de la reflexión total dentro del dispositivo, en cuanto a los planos plano epoxy-semiconductor y semiconductor-aire, respectivamente, y  $\eta_{\text{epoxy}}$  y  $\eta_{\text{air}}$  son las eficiencias del encapsulado epoxy y el aire.

La imagen de abajo muestra la proporción de eficiencia de extracción con y sin encapsulado epoxy. Se observa que la eficiencia de un LED semiconductor típico aumenta en un factor de 2 a 3 con un índice de refracción de 1,5.

La luz incide con un ángulo de aproximadamente 90° en el plano epoxy-aire, debido a la forma de la cubierta abovedada de epoxy. Así, el total de las pérdidas de una reflexión interna no se producen en el plano epoxy-aire. Además de mejorar la

eficiencia externa del LED, el encapsulado también se puede utilizar como una lente esférica para aplicaciones que requieran emisión directa, como puede ser en aplicaciones de comunicaciones.



LED (a) sin y (b) con encapsulado epoxy. (c) Eficiencia de extracción de luz emitidos con y sin encapsulado de epoxy

(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

### 1.6.3 DEPENDENCIA TEMPERATURA – INTENSIDAD

La intensidad de emisión de los LED desciende al aumentar la temperatura. Este descenso de la intensidad de emisión es debida a varios factores dependientes de la temperatura a nivel de recombinaciones en el interior del dispositivo.

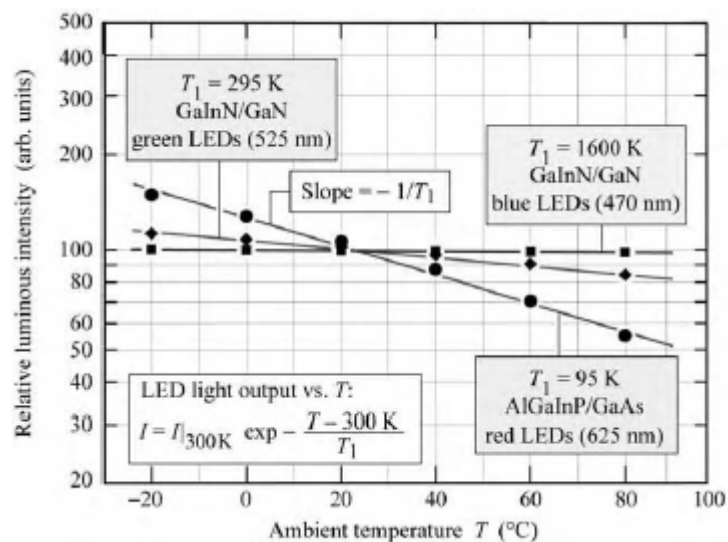
Esta relación está descrita en la ecuación:

$$I = I|_{300\text{K}} \exp - \frac{T - 300\text{K}}{T_1}$$

donde  $T_1$  es la temperatura característica, a mayor temperatura característica, menor dependencia de la intensidad con respecto a la misma.

Esta dependencia nos indica que a la hora de diseñar un modelo de LED, debemos tener precaución, de tal forma que la temperatura máxima en la unión a la máxima corriente de trabajo no sea mayor que la temperatura ambiente en las condiciones más exigentes.

En la imagen siguiente podemos ver las diferentes temperaturas características en función del tipo de LED que sea, del material del que está hecho y del color, a corriente constante.



**Diagrama de bandas de temperaturas para diferentes materiales**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Como podemos observar, el LED azul de GaInN/GaN tiene la temperatura característica más alta mientras que el LED rojo de AlGaInP/GaAs tiene la más baja de los tres, lo que hace que sean mucho más dependientes de la temperatura de trabajo los LED dopados con P, fosforados, que los dopados con N, nitrados.

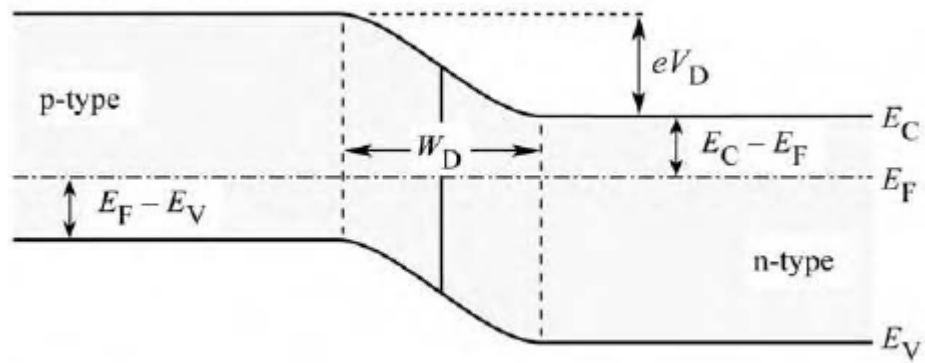
## 1.7 CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE LOS LED

### 1.7.1 TRAYECTORIA CURVA I-V DEL DIODO

Para describir las características eléctricas de la unión PN en los diodos, vamos a partir de un modelo ideal, en el que no van a entrar en juego agentes externos que modifiquen el comportamiento ideal de las partículas dentro de los LED ni impurezas que hagan variar su respuesta. Para ello, vamos a considerar una unión PN en la que  $N_a$  serán el número de aceptores y  $N_d$  el número de donadores. Todas estas partículas se van a asumir como perfectamente ionizadas y que, por lo tanto, todos los electrones del material serán tomados como  $n$  y además se cumplirá que  $n = N_d$  y que todos los huecos o cargas positivas vendrán como  $p$  y serán, a su vez,  $p = N_a$ .

También hablaremos de portadores. En un material semiconductor como los que vamos a analizar, existen los dos tipos de zonas con cargas mayoritarias y minoritarias, en función de la región de la que hablemos y de las cargas en sí. Pues bien, hablaremos de portadores minoritarios cuando nos queramos referir a las cargas que están en menor medida en una región concreta, y de portadores mayoritarios cuando nos refiramos a cargas que se encuentran en una situación de mayoría comparándolas con las demás.

En la zona de unión P-N, los electrones provenientes del lado tipo n penetran en la zona de tipo p donde encuentran multitud de huecos, con los que se recombinan. Un proceso parecido ocurre cuando los huecos inciden en la zona de tipo n. Como resultado de todo esto, la zona que se sitúa cerca de la unión entre los dos tipos de materiales, se queda vacía de portadores o cargas libres. Esta zona se denomina comúnmente zona de deplexión o vaciamiento, que se puede observar en la figura que se muestra a continuación y que tiene una anchura  $W_D$ , que calcularemos más adelante.



**Unión PN sin tensión de polarización**  
**(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)**

En ausencia de cargas o portadores libres en la zona de depleción, la única carga que existe en esta zona es la propia de ionización de los donadores y aceptores, los cuales forman una nueva área llamada zona de carga espacial. Esta zona de carga espacial produce una diferencia de potencial  $V_D$ , llamada tensión de difusión, que viene dada por la expresión:

$$V_D = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

en la que  $N_A$  y  $N_D$  son las concentraciones de aceptores y donadores, respectivamente, y  $n_i$  es la concentración interna de portadores del semiconductor.

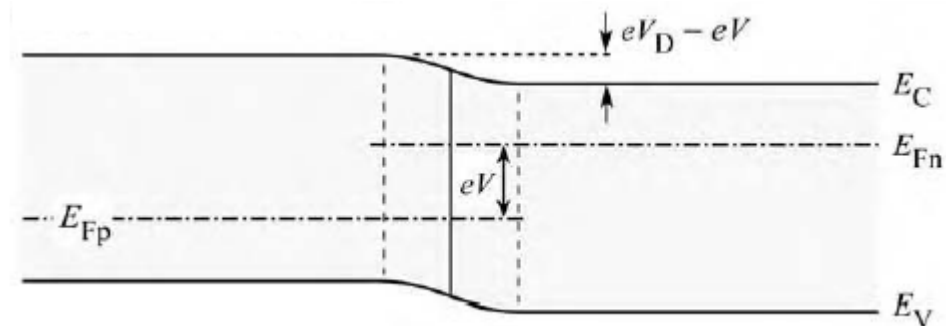
Podemos ver la tensión o diferencia de potencial de difusión en la figura que hemos mostrado más arriba, en el cual representa la barrera que deben superar las cargas libres para alcanzar la zona neutral contraria.

El ancho de la región de depleción, la carga en esta zona y la tensión de difusión están relacionadas mediante la ecuación de *Poisson*, más abajo.

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}(V_D - V)\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

en la que  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  es la permitividad del dieléctrico del semiconductor, y  $V$  es la tensión de polarización del diodo.

Podemos observar la diferencia de niveles de energía en una unión PN polarizada con una tensión  $V$  para comprender esta relación, a diferencia de la figura anterior, en la que no teníamos tensión de polarización.



**Unión PN con tensión de polarización**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Cuando se aplica una tensión de polarización en una unión PN, la misma va a dirigirse a la zona de deplexión. Esta región es muy resistiva, debido a que está vacía de cargas libres. Con esto, podemos suponer que una polarización externa de la unión PN en el semiconductor, va a producir un aumento o descenso de la barrera de la que hablábamos antes. Con polarización directa, electrones y huecos se inyectan a la región de deplexión con diferente tipo de conducción, y el flujo de corriente aumenta. Es decir, las cargas electrón y hueco penetran en la región contraria (lo que se llama corriente de difusión), dando lugar a una recombinación radiativa, y se emite un fotón de luz. Idealmente con cada recombinación se emitirá un fotón, como decíamos con anterioridad.

La gráfica característica I-V de las uniones PN, fue desarrollada por Shockley, y su curva está relacionada directamente con la ecuación que lleva su nombre.

$$I = eA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) (e^{eV/kT} - 1)$$

donde  $D_{n,p}$  y  $\tau_{n,p}$  son las constantes de difusión de electrones y huecos y los tiempos de vida de los portadores minoritarios, respectivamente.

En condiciones de polarización inversa de un dispositivo semiconductor con unión PN como el que estamos analizando, la corriente de saturación del diodo viene relacionada con la corriente del diodo a través de la ecuación anterior, de la forma:

$$I = I_s (e^{eV/kT} - 1) \quad \text{with} \quad I_s = eA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right)$$

Bajo condiciones de polarización directa, la tensión del diodo es  $V \gg kT / e$ , y por lo tanto,  $[\exp (eV/kT) - 1] \approx \exp (eV/kT)$ . Si lo utilizamos en la expresión de la tensión de difusión del principio, podemos escribir, para estas condiciones:

$$I = eA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) e^{e(V-V_D)/kT}$$

Si analizamos la expresión anterior, vemos cómo la corriente aumenta enormemente a medida que la tensión del diodo se aproxima a la tensión de difusión. Este punto, en el que la corriente aumenta de esta forma, se alcanza en un punto de la tensión del diodo en el que su valor es casi igual al de la tensión de difusión. Comúnmente se le llama a tensión umbral  $V_{th}$  y, como hemos dicho, es  $V_{th} \approx V_D$ .

En la imagen del principio en el que mostrábamos una las bandas de energía de una unión PN, podemos observar también la separación entre el nivel de Fermi y las bandas de valencia y de conducción. La diferencia de energías entre el nivel de Fermi y las bandas, para según qué material, pueden escribirse según las estadísticas de Boltzman:

Para el material de tipo N 
$$E_C - E_F = -kT \ln \frac{n}{N_c}$$

Para el material de tipo P 
$$E_F - E_V = -kT \ln \frac{p}{N_v}$$

Si volvemos a la imagen de las bandas de energía del principio del capítulo, vemos que la suma de las energías es cero:

$$eV_D - E_g + (E_F - E_V) + (E_C - E_F) = 0$$

En semiconductores con un nivel de dopado considerable, la separación entre las bandas de energía y el nivel de energía de Fermi es pequeño, si lo comparamos con la energía del gap,  $(E_C - E_F) \ll E_g$  en el lado tipo N y  $(E_F - E_V) \ll E_g$  en el lado tipo P. Además, estas cantidades dependen de forma logarítmica de la concentración de dopado como vemos en las ecuaciones anteriores que relacionaban energías, con lo cual se puede despreciar como aproximación, y nos quedaría para la expresión anterior una relación entre la tensión de difusión, la tensión umbral, la energía del gap y la carga eléctrica básica.

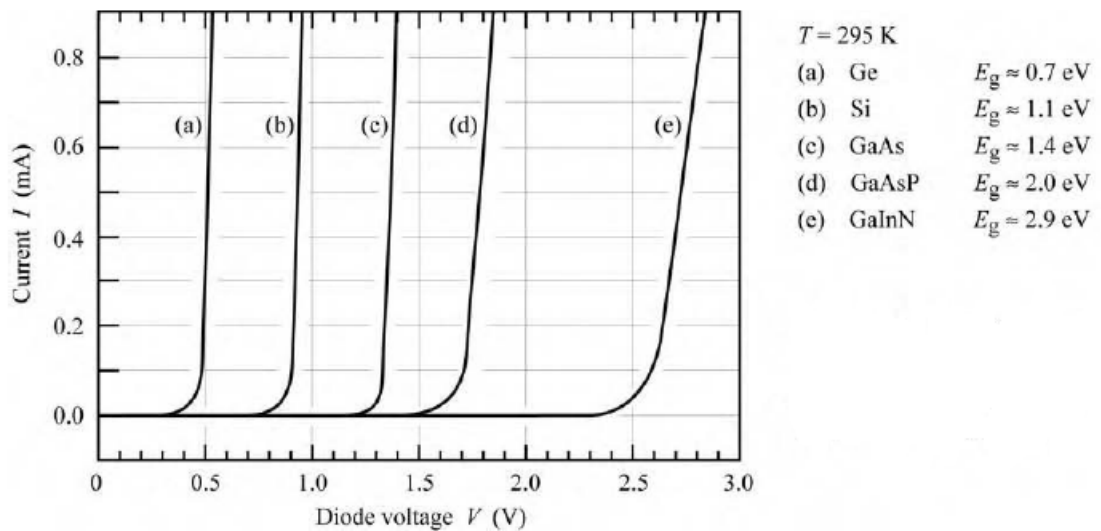
$$V_{th} \approx V_D \approx E_g / e$$

Esta expresión es importante para la mayoría de supuestos de casos prácticos en dispositivos de este tipo, ya que el error que se comete admitiendo estas expresiones como totalmente válidas es muy bajo, tanto que podemos despreciarlo



para nuestros casos, siempre y cuando hablemos de diodos no basados en elementos III-V, en cuyo caso existen variaciones como veremos más abajo.

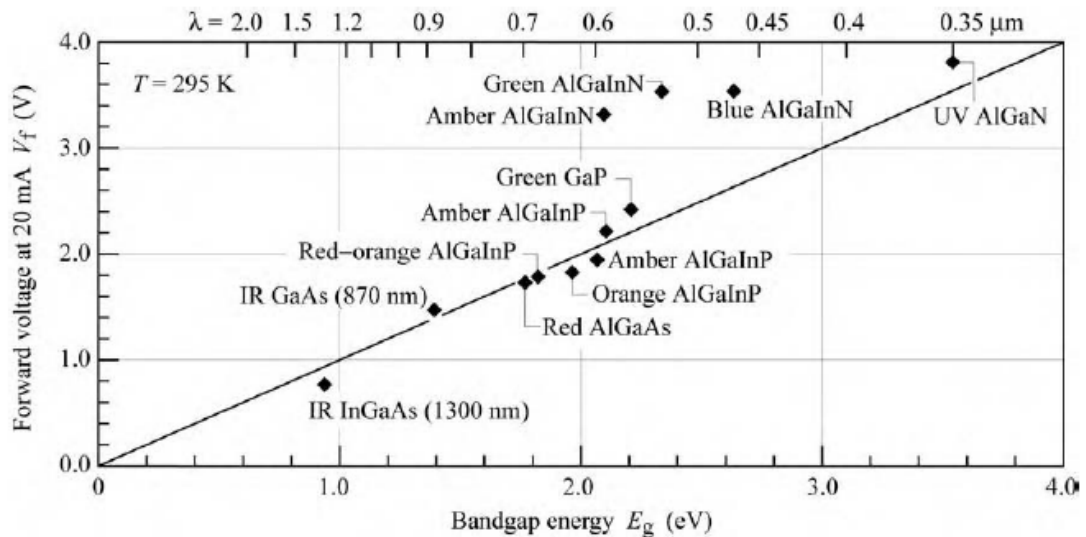
A continuación tenemos una demostración de lo anterior. En la imagen podemos ver las curvas características I-V de varios semiconductores en función del material con el que están fabricados, tomadas como reales, sin aproximaciones numéricas. Si analizamos los resultados sobre la gráfica con las curvas, observamos que la curva real y el supuesto numérico partiendo de la expresión de arriba son asombrosamente parecidos, casi iguales, ya que se hace muy complicado ver las diferencias en una escala como la que se muestra.



**Gráficas I-V para diferentes materiales**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Como avance, podemos decir que la mayoría de diodos utilizados de forma cotidiana tienen una tensión umbral de alrededor de 0,7, que correspondería con los fabricados con Ge en la imagen anterior.

Más abajo, se muestra una gráfica con los valores de energía de gap para un diodo común, con una corriente de polarización de 20mA, y para LED en los rangos visible, ultravioleta y el infrarrojo del espectro.



**Gráfica de energía de gap y tensión para diferentes materiales**

(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Si analizamos la gráfica, vemos que la mayor parte de los diodos semiconductores se sitúan entorno a la línea más marcada, que tiene pendiente constante. Esta línea pertenece al diodo común, que cumple con las aproximaciones de las que hemos hablado antes. La pendiente es 1, ya que en la expresión aproximada de la tensión umbral, veíamos que era igual que la energía de gap expresada en eV. La excepción la ponen todos los diodos que podemos observar en la parte superior de la gráfica, que son los basados en elementos III-V, llamados nitruros. Este comportamiento se debe a varios efectos que tienen lugar en este tipo de semiconductores, se producen discontinuidades en la banda de gap en los sistemas basados en nitruros, que hacen que la tensión caiga. También, los contactos en este tipo de materiales no están del todo depurados, con lo cual se producen pérdida de tensión en ellos. Además, la conductividad en las inmediaciones de la zona P de GaN es reducida como norma general. Por último, en ocasiones se puede producir una caída de tensión parásita en los extremos de la zona N.

Como conclusión a la gráfica anterior, vamos a utilizar esta aproximación para la relación entre tensión umbral y energía de gap para la mayoría de los materiales semiconductores y para todos los LED no basados en III-V, ya su comportamiento se ajusta bastante al de un diodo convencional en este aspecto.

### 1.7.2 DESVIACIONES DE LA TRAYECTORIA DE CURVA CARACTERÍSTICA IDEAL I-V

A parte de lo visto con anterioridad para la curva I-V de los diodos en cuanto a tensión umbral, vamos a ver casos en los que se produce una desviación de la curva, hecho que será muy útil para nosotros más adelante.

Como introducción, vamos a definir la corriente dentro de la curva I-V del diodo a partir de la expresión de Shockeley:

$$I = I_s e^{eV/(n_{\text{ideal}} kT)}$$

donde  $n_{\text{ideal}}$  es el factor de idealidad del diodo. Este factor muestra cuánto de ideal es el comportamiento de un diodo. Para un diodo ideal, el factor de idealidad es 1. Para diodos reales más comunes, podemos tener valores que oscilan entre 1.1 y 1.5. Sin embargo, para los diodos basados en nitruros y fosfatos, III-V, los valores son mayores de 2. Para algunos formados por GaN o GaInN podemos tener valores de hasta 7.

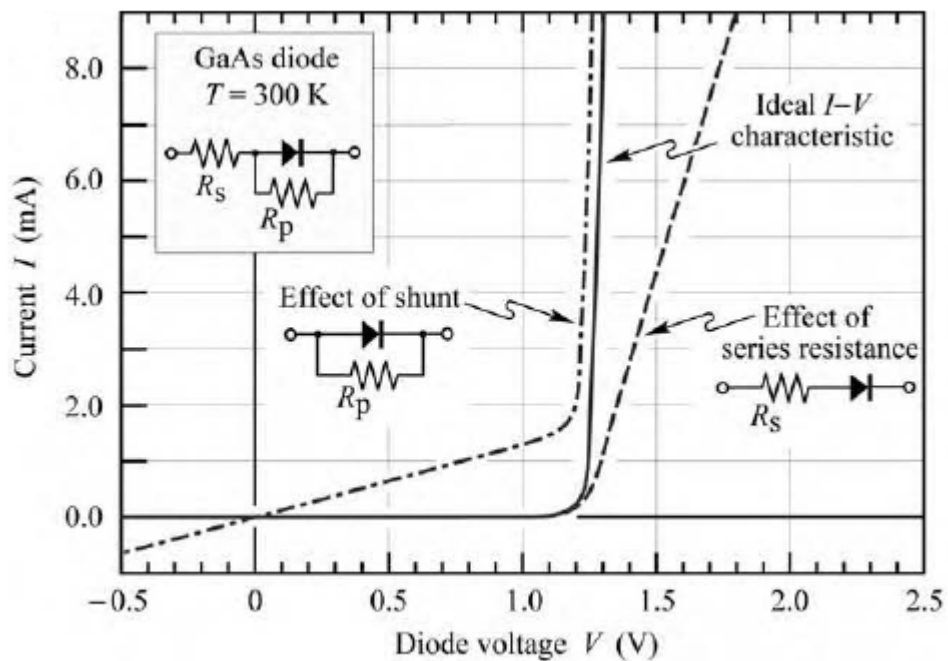
De cualquier forma, muy habitualmente, los diodos sufren el efecto de resistencias parásitas. Sus efectos son equivalentes a poner resistencias en serie o en paralelo dependiendo de varios factores. Una resistencia en serie puede aparecer por un contacto resistivo excesivo o por la resistencia de las zonas libres. Una resistencia en paralelo puede aparecer por cualquier agente parásito que actúe como puente en la unión PN. Estos agentes pueden ser debidas a zonas dañadas del dispositivo imperfecciones del material.

Con estos hechos, la expresión anterior de la corriente debe ser modificada para considerar la posibilidad de que aparezcan resistencias parásitas. De esta forma, tendremos nuestro diodo en una rama, con una resistencia en paralelo  $R_p$  y una resistencia en serie  $R_s$ , y la expresión nos quedará

$$I - \frac{(V - IR_s)}{R_p} = I_s e^{(V - IR_s)/(n_{\text{ideal}} kT)}$$

Para mantener el comportamiento ideal del diodo en los cálculos, ahora sólo tendremos que considerar una resistencia en serie de valor 0 y una resistencia en paralelo de valor  $\infty$ .

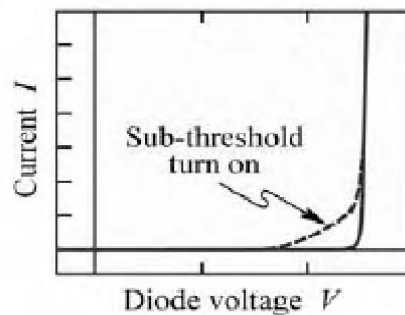
Con todo lo anterior, podemos ver una gráfica en la que se observa la diferencia entre una curva de un diodo ideal, sin componentes parásitas, y un diodo con resistencias parásitas, tanto  $R_s$  como  $R_p$ .



**Efectos gráficos de la presencia de resistencias serie y paralelo**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

En algunas ocasiones, aparece un efecto en el que no hemos reparado antes, que es el del transporte de portadores. Este efecto se traduce en una variación en torno a la zona de curvatura I-V modificándose ligeramente el umbral de la misma.

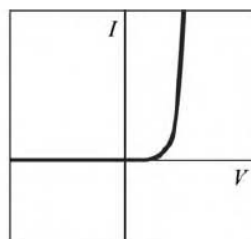
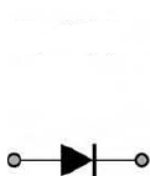
Existe otro efecto, que se da en ocasiones, llamado de Condiciones Prematuras, en el que la tensión umbral del diodo no es tal un valor fijo, sino que es un rango de valores de tensiones, con lo cual en lugar de ver un aumento de la corriente a partir de un valor determinado de forma abrupta, la corriente se va incrementando proporcionalmente en un rango de valores de tensión umbral, pero no de forma abrupta como antes, sino más suave y prolongadamente. Este efecto lo podemos observar en la gráfica de abajo.



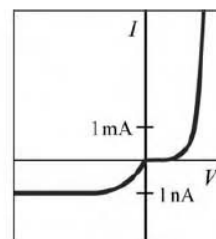
**Efecto de modificación de curva I-V**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

A continuación vamos a proponer un análisis más detallado en escalas lineal y logarítmica de las curvas de los diodos para poder estudiar un poco mejor estos problemas de resistencias parásitas, condiciones prematuras y demás. Se propondrán varias gráficas donde se ve más claramente la tendencia de las curvas I-V en cada condición.

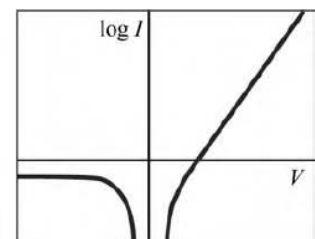
### Diodo Ideal



LINEAL



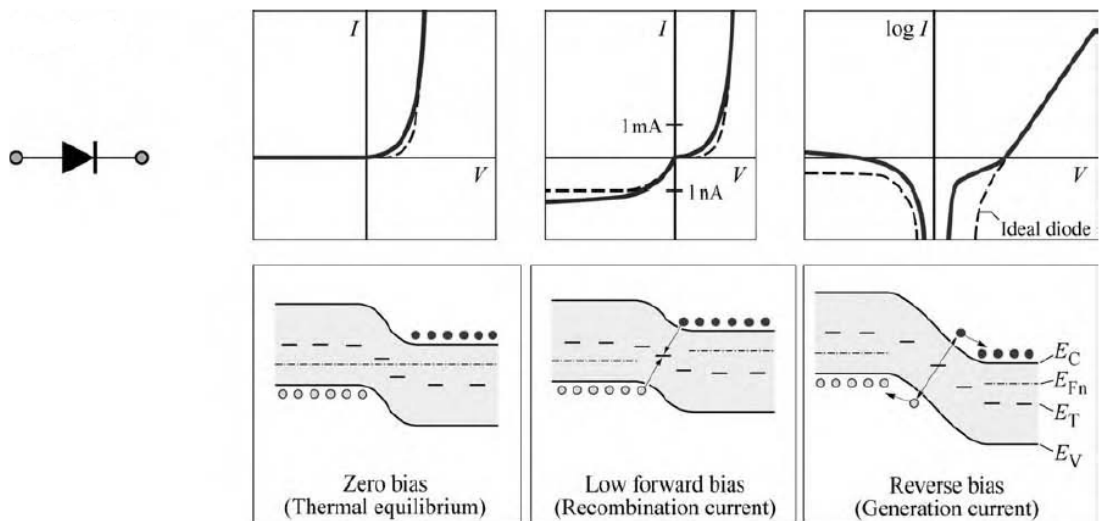
ESCALA I NEGATIVA



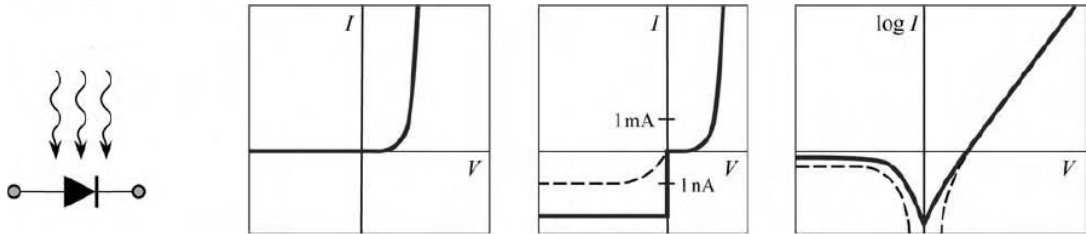
LOGARÍTMICA

Las gráficas anteriores son las pertenecientes a un diodo ideal, caracterizado por las ecuaciones de Shockley.

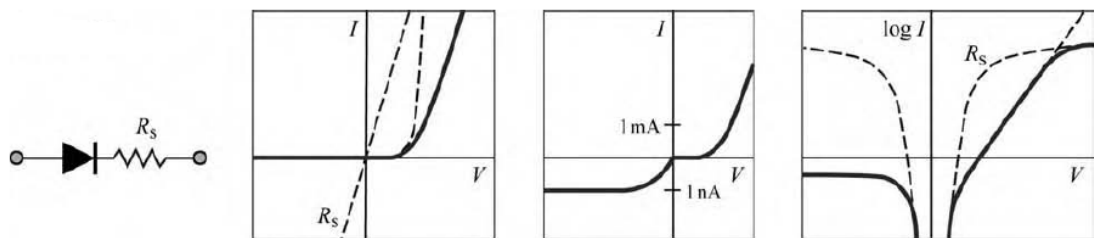
#### Región de deplexión, generación y recombinación



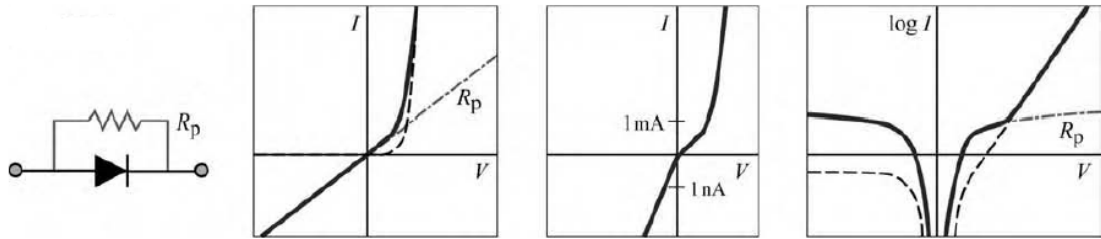
La ecuación de Shockley no considera la generación y recombinación de portadores en la región de deplexión. Sin embargo, en los diodos corrientes, existen niveles trampa en la región de deplexión, que posibilitan la aparición de este fenómeno. La generación de portadores provoca un exceso de la corriente para polarización directa e inversa. En polarización directa, el exceso de corriente es debida a la recombinación de portadores minoritarios en la región de deplexión. Esta corriente de recombinación sólo se considera dominante a bajos niveles de tensión, con lo que obtenemos factores de idealidad de 2. Para tensiones superiores, domina la corriente de difusión, dando como resultados factores de idealidad de 1. En polarización inversa, el exceso de corriente es debida a la generación de portadores en la región de deplexión. Bajo la influencia de estas corrientes, las cargas generadas se acumulan en las regiones neutrales. Esta corriente de generación se incrementa en polarización inversa debido al incremento de la anchura de la región de deplexión.

Fotocorriente

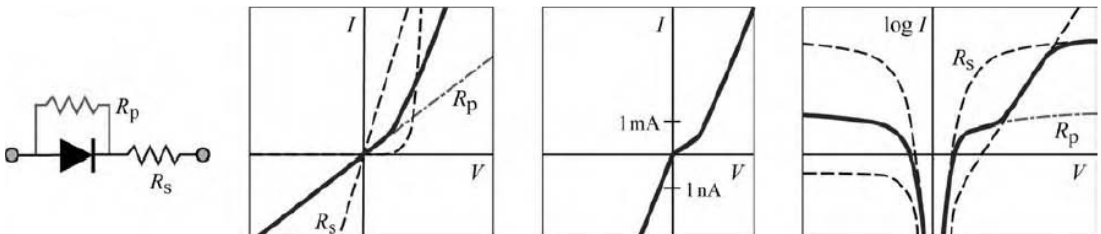
En un entorno con luz, un diodo con encapsulado transparente genera fotocorriente. Por esto, las medidas han de hacerse en entornos oscuros y tapando el revestimiento del diodo, para reducir este efecto. En la oscuridad, a tensión nula, la corriente debería ser nula, pero existe una pequeña corriente del orden de pA.

Diodo con resistencia en serie

Un diodo con una resistencia en serie ofrece una desviación del comportamiento exponencial a altas tensiones de polarización. De acuerdo a las leyes de Kirchoff, las tensiones de diodo y resistencia han de sumarse. En las gráficas vemos el comportamiento lineal y logarítmico sobre las gráficas lineal y semi-logarítmica.

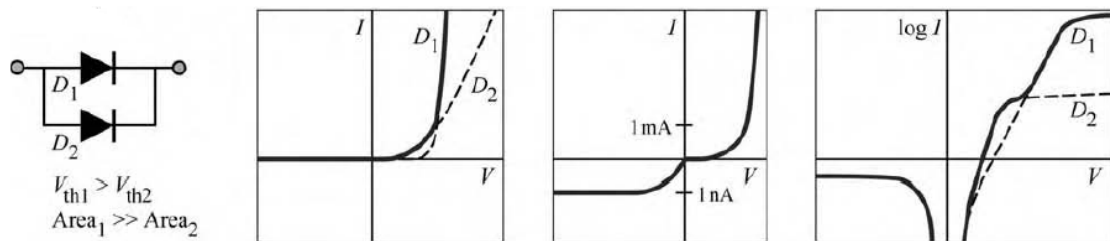
Diodo con resistencia en paralelo

De acuerdo a las leyes de Kirchoff, las corrientes en el diodo y la resistencia se suman. Muy importante el detalle de que el nivel de corriente en el codo de la corriente en directa de la gráfica semi-logarítmica tiene el mismo valor que la corriente de saturación. Este comportamiento es muy útil a la hora de identificar un efecto de resistencia en paralelo.

Diodo con resistencias en serie y paralelo

Vemos el efecto de las resistencias paralelo y serie producido a bajas y altas corrientes respectivamente.



Diodo con efecto de condiciones prematuras**1.7.3 ESTUDIO DE LAS RESISTENCIAS PARÁSITAS DEL DIODO**

Vamos a estudiar el efecto de las resistencias parásitas en paralelo del diodo centrándonos en la zona origen de la curva I-V, donde  $V \ll E_g/e$ . Podemos aproximar la resistencia en paralelo despreciando la corriente de la unión PN:

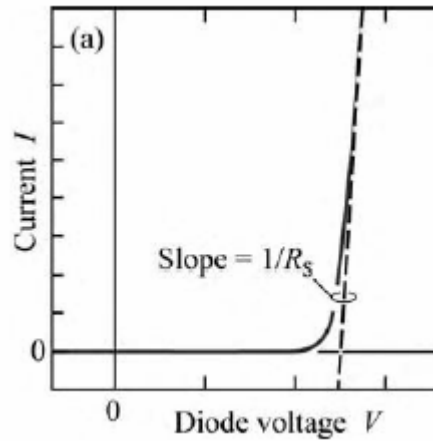
$$R_p \approx \left. dV/dI \right|_{\text{near origin}}$$

Como la resistencia en paralelo es mucho mayor que la serie, vamos sólo a considerar el efecto de la resistencia en paralelo.

La resistencia en serie se puede evaluar para tensiones altas donde  $V > E_g / e$ . Para tensiones suficientemente grandes, la característica V-I del diodo se convierte en lineal y la resistencia serie viene dada por la tangente a la curva V-I, como se muestra en la siguiente figura.

$$R_s = \left. dV/dI \right|_{\text{at voltages exceeding turn-on}}$$

Puede que no sea muy práctico estudiar el comportamiento de la resistencia a altos voltajes, por esto, el procedimiento siguiente se adapta mejor a nuestras necesidades



#### Método tangente de cálculo de $R_s$

(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

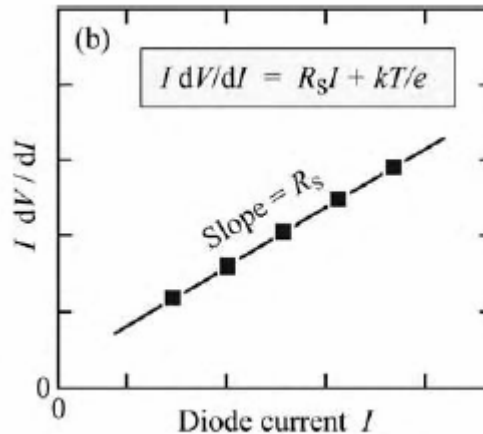
Para dispositivos con una alta resistencia en paralelo ( $R_p \rightarrow \infty$ ), la curva I-V del diodo viene dada por

$$I = I_s e^{e(V - IR_s)/(n_{\text{ideal}} kT)}$$

Resolviendo esta ecuación para  $V$  y derivando  $V$  con respecto  $I$ :

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{n_{\text{ideal}} kT}{e} \frac{1}{I}$$

En la que es segundo sumando de la ecuación representa el diferencial de la resistencia de la unión PN. La multiplicación de la ecuación por  $I$  permite identificar la resistencia serie del diodo. Este resultado lo podemos ver en la siguiente gráfica

Cálculo de  $R_s$  en forma gráfica

(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

#### 1.7.4 ENERGÍA DE EMISIÓN

La energía de los fotones emitida por un semiconductor con energía determinada, viene determinada por la energía de banda de *gap*.

$$h\nu \approx E_g$$

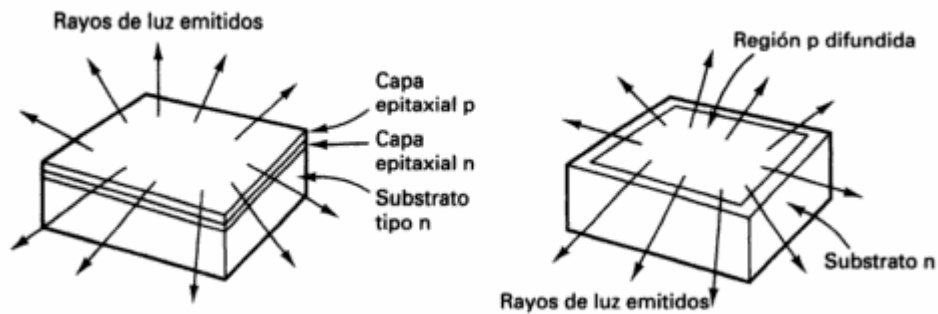
En condiciones ideales, cada electrón inyectado produce un fotón, con lo cual no debe haber pérdida de energía. Esto significa que la energía del fotón sea la misma que la energía de inyección del electrón, es decir:

$$eV = h\nu$$

De la ecuación anterior podemos sacar como conclusión que la tensión aplicada al LED multiplicada por la carga del electrón debe ser igual que la energía que emitirá el fotón que se producirá. Esto sucedería en un caso ideal, existen muchos factores que pueden hacer que este hecho varíe.

### 1.7.5 DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN HOMOUNIONES PN

Los LED de homounión son aquellos que están formados por una unión PN de dos mezclas distintas de material de igual tipo de átomos. Las estructuras más sencillas de LED son las de homounión y de crecimiento epitaxial o dispositivos semiconductores de un solo semiconductor difundido, como los dos que se ven más abajo en el dibujo. Los LED de crecimiento epitaxial se fabrican por lo general con Arseniuro de galio dopado con silicio. Las ondas luminosas producidas en fuentes de homounión no producen una luz muy útil para fibra óptica. La luz se emite en todas las direcciones por igual y en consecuencia solo una pequeña fracción del total de la luz producida se acopla en la fibra, además la relación de potencial convertido en luz es muy baja. A los dispositivos de homounión se los llama con frecuencia emisores superficiales.



La distribución en las homouniones PN depende de la constante de difusión de los portadores. La constante de difusión de los portadores no es fácil de medir. Es mucho más práctica la medida de la movilidad de los portadores. La constante de difusión se puede obtener de las relaciones de Einstein, así viene dada por

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n$$

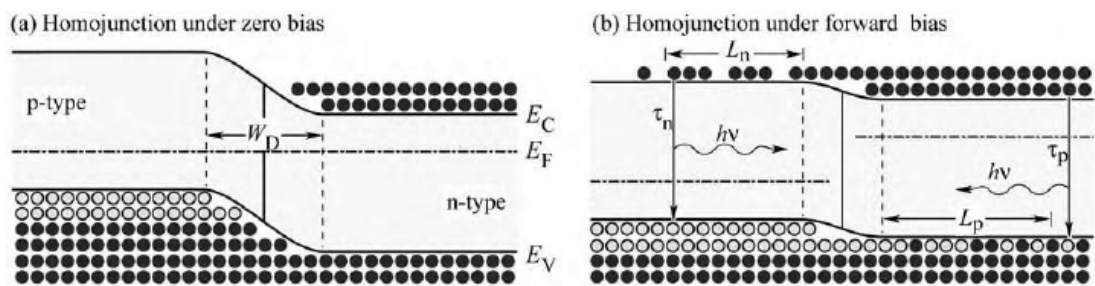
$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p$$

Los portadores inyectados en semiconductor con carga neutra, se propagan por difusión. Así, si los portadores son inyectados en una zona de carga contraria, se produce recombinación. La distancia media en la que un portador minoritario se propaga por difusión es la distancia de difusión, llamada así de forma convencional. Los electrones inyectados en la zona tipo P entran en difusión en la distancia de difusión  $L_n$ , antes de recombinarse con los huecos.

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \qquad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

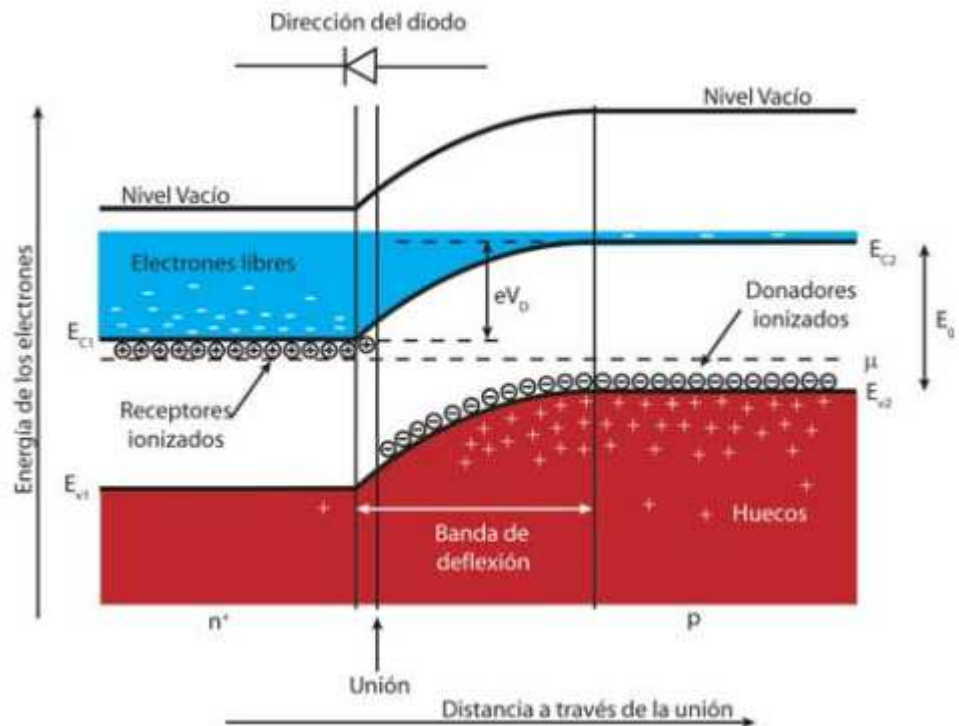
En las expresiones anteriores,  $\tau_n$  y  $\tau_p$  son los tiempos de vida de los portadores minoritarios, del electrón y del hueco respectivamente. Comúnmente la distancia de difusión en materiales ronda el orden de magnitud de micrómetros, región donde se distribuyen los portadores.

La distribución de portadores de uniones PN en condiciones tensión de polarización nula y directa se pueden observar en el siguiente gráfico.



**Condiciones de polarización en homouniones**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

A continuación presentamos un dibujo en el que la zona N tiene mayor dopaje que la zona P, por lo que el nivel de Fermi del tipo N está más cerca de la banda de conducción que el segundo. El nivel que aparece vacío representa la energía que necesita un electrón para escapar completamente del semiconductor.



**Diagrama de las bandas de una homounión p-n, donde se muestran las posiciones relativas de los electrones y lo huecos**

(Espectroscopía de polarización, Tesis A.Reyes)

Los electrones en el semiconductor tipo N provienen de principalmente de donadores ionizados que poseen una energía cercana al límite de la banda de conducción  $E_{c1}$ . Sin embargo, los huecos del material de tipo P provienen de receptores ionizados cuya energía es cercana al límite de la banda de valencia  $E_{v2}$ . En condiciones de equilibrio termodinámico, una carga electrón que va de N a P tiene que subir de energía  $eV_D$  como vimos antes, vuelve a aparecer la expresión:

$$eV_D = E_g - (E_{c1} - \mu) - (\mu - E_{v2})$$

El exceso de portadores desaparece por recombinación de electrones y huecos. Esto quiere decir que un electrón con una energía dada cae a un estado de menor energía libre de electrones. En este proceso se desencadena una recombinación radiativa y se produce un fotón.

Como hemos visto en lo anterior, en las homouniones, todas las recombinaciones se producen en una distancia de difusión grande, lo que hace que no sea lo suficientemente eficiente en la práctica en LED.

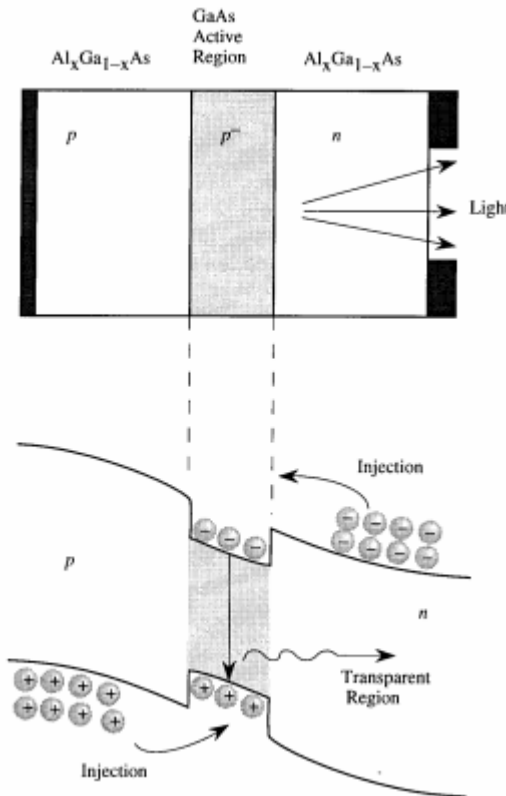
#### 1.7.6 DISTRIBUCIÓN DE PORTADORES EN HETEROUNIONES PN

El volumen de emisión de fotones de un material semiconductor debe estar cerca de la superficie de manera que los fotones emitidos no sean reabsorbidos. Cerca de la superficie, la calidad del semiconductor normalmente no es muy buena por lo que existirán muchos defectos que producen recombinaciones no radiativas, haciendo que la estructura no sea eficiente.

Este problema lo solucionamos con los materiales de estructura heterogénea, también llamados heterouniones comúnmente. Estas estructuras utilizan dos tipos de materiales en cuando a las anchuras de las bandas prohibidas de cada uno de ellos. Así, se inyectan cargas desde un material de mayor anchura de banda prohibida en una región activa de un material con menor ancho de banda prohibida. Estas cargas, electrones y huecos, van desde las zonas P y N de mayor anchura de banda prohibida a una zona activa P, con menos anchura, donde pueden dar lugar a recombinaciones y emisión de fotones lejos de la superficie, puesto que tienen dos barreras energéticas que impiden a las cargas situarse en estas regiones. Este hecho da lugar a que la región de recombinación depende exclusivamente de la anchura de la región activa, y no de la región de difusión que vimos en las homouniones. Si tenemos un material con dos anchos de banda prohibida grande la llamamos doble heteroestructura.

La región activa suele tener un grosor de  $0,1\mu\text{m}$  a  $0,2\mu\text{m}$  y los materiales más usados son GaAs/AlGaAs sobre substrato de GaAs y InGaAsP/InP y InGaAs/InGaAsP sobre substrato de InP.

En la siguiente figura podemos ver un ejemplo gráfico básico de lo explicado arriba.



**El LED de heterounión utiliza un semiconductor de gap estrecho para la región activa**  
**(Artículo *El diodo LED*, Universidad de Valencia)**

Como vemos, el LED de heterounión utiliza un semiconductor de *gap* estrecho para la región activa. Los fotones emitidos no se absorben por las capas superior o inferior que son transparentes para la radiación emitida.

Los portadores inyectados en la región activa de la heteroestructura doble se limitan a la región activa por medio de las barreras. Como resultado, el espesor de la región en la que los portadores se recombinan está dado por el espesor de la región activa en lugar de la longitud de difusión.

Las consecuencias de este cambio son significativas. Se supone que el espesor de la región activa es mucho menor que la longitud de difusión típica. Las longitudes de difusión pueden ir desde 1 a 20  $\mu\text{m}$ . La región activa de uniones heterogéneas dobles puede ir desde 0.01 hasta 1.0  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, los portadores en la región activa de una heteroestructura doble tienen una concentración mucho más alta que



los portadores en uniones homogéneas, que se distribuyen en varias longitudes de difusión. Recordando que la tasa de recombinación radiativa viene dada por la ecuación:

$$R = Bnp$$

Con estos datos, concluimos que una doble heteroestructura será lo más eficiente para nuestros cometidos en LED, ya que una alta concentración de portadores en la región activa incrementa la tasa de recombinación radiativa y disminuye el tiempo de vida de recombinación.

#### 1.7.7 EFECTO DE UNIONES HETEROGÉNEAS EN DISPOSITIVOS RESISTIVOS

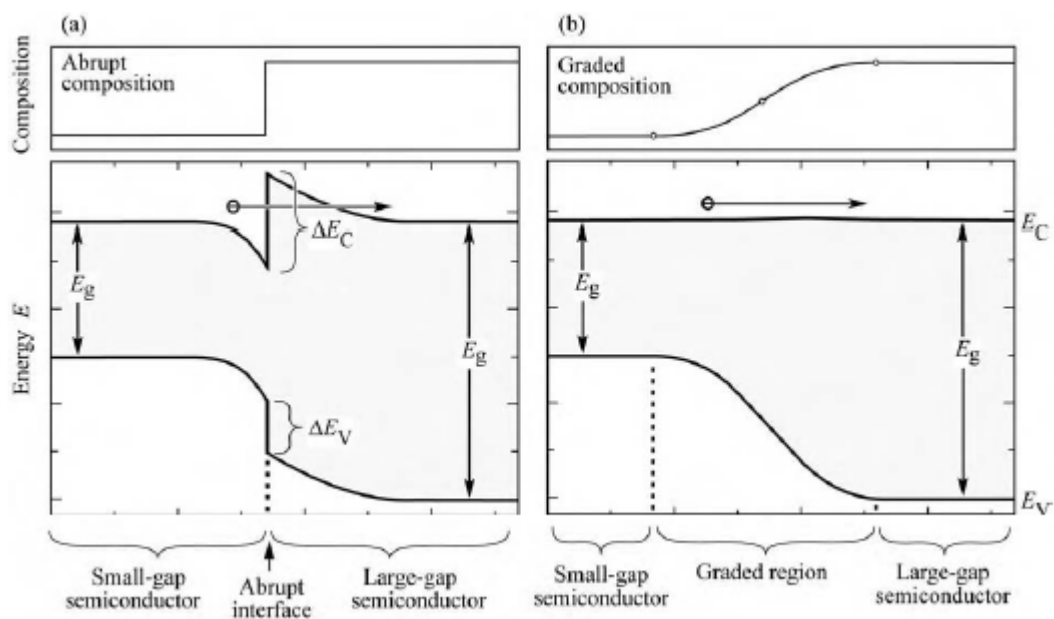
Comentábamos antes que las heteroestructuras permiten mejorar la eficiencia de los LED, limitando los portadores en la región activa y evitando la difusión de portadores minoritarios en largas distancias. No obstante, a pesar de esta enorme ventaja, existen algunas peculiaridades en el uso de este tipo de uniones para los diseños de LED.

Uno de los principales problemas de estas estructuras es el de la resistencia que se crea debida a la heterointerfaz. Las heteroestructuras consisten en dos semiconductores con diferente energía en la banda prohibida y ambos lados de la heteroestructura son de conectividad de tipo n. Los portadores en el material de la banda prohibida mayor se difundirán al material de la banda prohibida pequeña donde ocupan los estados de la banda de conducción de baja energía. Como resultado de la transferencia del electrón, se forma un dipolo electrostático, constituido por una capa de agotamiento de carga positiva con donadores ionizados en el material de la banda prohibida grande, y una capa de acumulación de electrones de carga negativa en el material de banda prohibida pequeña. La transferencia de portadores de un semiconductor a otro debe superar esta barrera ya sea por un túnel o por emisión

térmica encima de la barrera. La resistencia causada por uniones heterogéneas puede tener un fuerte efecto perjudicial sobre el rendimiento del dispositivo, especialmente en dispositivos de alta potencia. La energía térmica producida por resistencia de heteroestructura se traduce en el calentamiento de la región activa, disminuyendo así la eficiencia radiativa.

Se ha demostrado que las discontinuidades en la banda de la heteroestructura pueden corregirse completamente por graduación de la composición química del semiconductor en la proximidad de la heteroestructura.

En la siguiente figura se muestra la comparativa entre el diagrama de bandas de dos heteroestructuras, una común y otra graduada



**Modelos de bandas con composiciones abrupta y graduada**

(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

En la figura anterior, comparando ambos diagramas, vemos que en la parte de heteroestructura graduada no hay un aumento de la banda de conducción que suponga un obstáculo para el flujo de electrones. Mediante este proceso, podemos

eliminar por completo el efecto resistivo adicional introducido por las heteroestructuras abruptas.

Ahora intentamos explicar el porqué de la forma parabólica de la región de graduada. El material de la banda prohibida amplia se agotará de portadores libres debido a la transferencia de electrones del material de la banda prohibida pequeña. Así la concentración de carga en el material de la banda prohibida amplia será el de la concentración de donantes. Suponiendo que la concentración de donantes es una constante en toda la heteroestructura, con la solución de la ecuación de *Poisson* se obtiene el potencial electrostático.

$$\Phi = \frac{eN_D}{2\epsilon} x^2$$

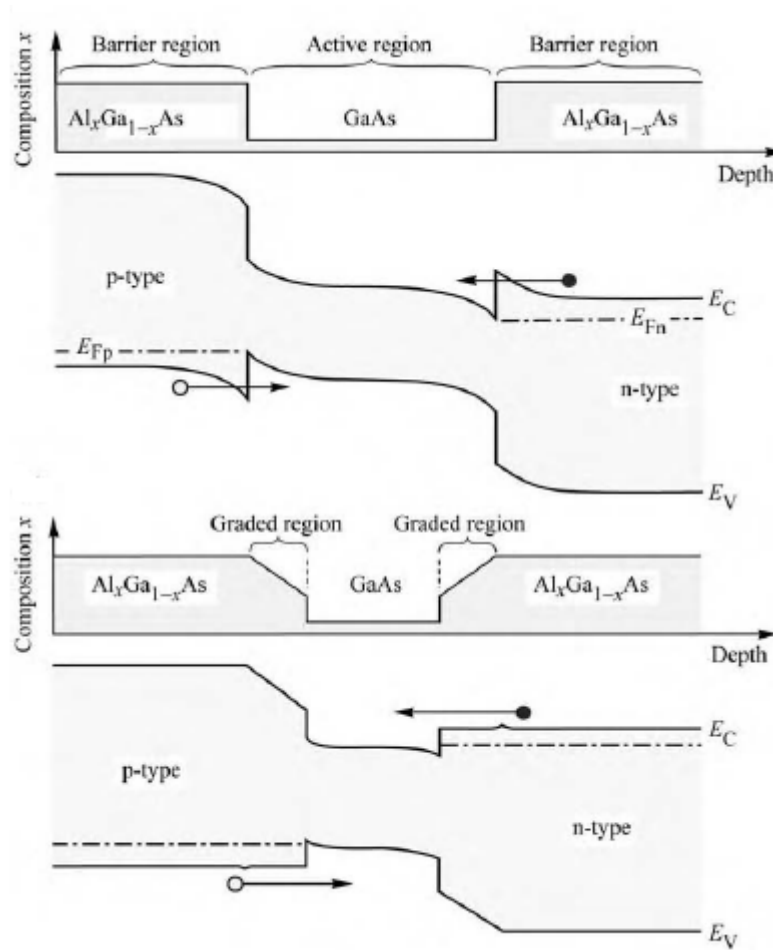
La ecuación anterior muestra que el potencial depende de forma cuadrática de la coordenada  $x$  (espacio), con lo cual, el potencial tiene forma parabólica. Con el objeto de compensar la forma parabólica del potencial de la zona de agotamiento (depleción), tenemos una composición variada de los semiconductores, así suelen resultar planos de potencia. En teoría, la variación parabólica de composición química se traduce en una variación parabólica de la energía de la banda prohibida, con lo cual, las dos se relacionan linealmente entre sí, energía y composición química del semiconductor.

Suponemos que la discontinuidad de una banda de conducción de una unión heterogénea abrupta viene dada por  $AEC$  y que la estructura está uniformemente dopada con concentración de donadores. Vamos a suponer que los portadores se han trasladado a la banda prohibida pequeña del semiconductor, causando así una región de agotamiento de espesor  $WD$  en la banda prohibida grande del semiconductor. Si el potencial creado en la región de agotamiento es igual a  $AEC / e$ , entonces los electrones no se trasladarán a lo largo de la banda prohibida pequeña del material. El espesor de la región de agotamiento sería la siguiente.

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon\Delta E_C}{e^2 N_D}}$$

La interfaz de una heteroestructura debe ser graduada con la distancia  $W_D$  con el objetivo de minimizar la resistencia introducida por la heteroestructura abrupta. Aunque el resultado de la ecuación anterior es una aproximación, es una excelente aproximación a la hora del diseño.

La graduación es útil para todas las heteroestructuras, incluyendo las heteroestructuras adjuntas a la región activa. El efecto de la graduación en una heteroestructura doble se muestra en la siguiente figura, donde se aprecia en la primera parte de la figura la composición y el diagrama de banda de una estructura no graduada. En ambas heterointerfaces, las barreras son resultado de la transferencia de carga libre a la región activa. Estas barreras incrementan la resistencia del dispositivo en polarización directa.



**Diagrama de bandas de una heteroestructura doble**  
**(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)**

La primera figura muestra una heteroestructura abrupta y en la segunda una graduada. Volvemos a ver que las barreras en la heterointerfaz se pueden eliminar en parte o por completo por graduación.

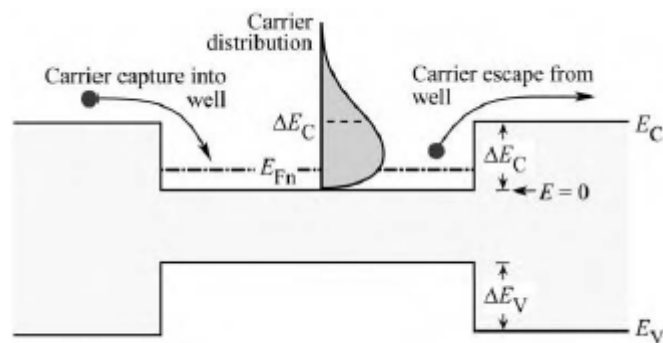
Por lo general, como norma, el transporte de los portadores dentro del dispositivo en heteroestructuras no debe generar calor innecesario. Todo el calor adicional conduce a una pérdida de rendimiento debido al incremento que se produce en la temperatura de funcionamiento.

### 1.7.8 PÉRDIDAS DE PORTADORES EN HETEROESTRUCTURAS DOBLES

En un LED ideal, los portadores inyectados se limitan a la región activa por las capas de barreras adyacentes a las regiones activas. Por medio de confinamiento de portadores de la región activa se consigue una elevada concentración de portadores resultando una elevada eficiencia del proceso de recombinación.

Las barreras de energía que limitan los portadores a la región activa son del orden de varios cientos de meV, es decir, mucho mayores que  $kT$ . No obstante, algunos de los portadores pueden escaparse de la región activa hacia las zonas de barrera. La concentración de portadores que ha escapado será más bien baja, dando lugar a una baja eficiencia radiativa de portadores en la zona de barreras.

Los portadores libres en la región activa se distribuyen de acuerdo a la distribución de Fermi-Dirac y, como resultado, algunos portadores tendrán una energía superior a la altura de la barrera de contención. Así algunos de los portadores escapan de la región activa en las zonas de barrera.



**Entrada y salida en una heteroestructura doble y distribución de portadores**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Consideraremos electrones en la región activa de una heteroestructura doble y suponemos que la región activa está revestida por una barrera con longitud AEC, como se muestra en la figura. La distribución de energía de los portadores viene dada por la distribución de Fermi-Dirac. Por lo tanto, una parte de los portadores ubicados en la

región activa tienen una energía superior al nivel de energía de la barrera. La concentración de electrones con energía superior a la de barrera es la que se muestra a continuación

$$n_B = \int_{E_B}^{\infty} \rho_{\text{DOS}} f_{\text{FD}}(E) dE$$

donde  $\rho_{\text{DOS}}$  es la densidad de los estados,  $f_{\text{FD}}$  es la función de distribución de Fermi-Dirac y  $E_B$  es la altura de la barrera.

La concentración de portadores con energía superior a  $E_B$  sería

$$n_B = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_B}^{\infty} \frac{\sqrt{E - E_C}}{1 + e^{(E - E_{Fn})/kT}} dE$$

Teniendo en cuenta que estamos interesados en portadores con energías superiores al nivel de Fermi, la distribución de Fermi-Dirac se puede aproximar a la distribución de Boltzmann

$$n_B = N_c e^{(E_{Fn} - E_B)/kT}$$

donde  $N_c$  es la densidad efectiva en la región activa. De la ecuación anterior se obtiene la concentración de portadores libres en la interfaz entre la región activa y la región de revestimiento (*cladding*). Los portadores minoritarios en el borde de la capa de revestimiento se difundirían a la capa de revestimiento. El proceso de difusión dependerá de la concentración inicial  $n_B$  y de la longitud de difusión electrones  $L_n$ .

Teniendo la ubicación en el origen ( $x=0$ ) en el borde de la barrera, la distribución de los portadores se puede escribir como

$$n_B(x) = n_B(0) e^{-x/L_n} = N_c e^{-(E_B - E_{Fn})/kT} e^{-x/L_n}$$

donde  $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$  es la longitud de difusión,  $\tau_n$  es la vida útil de los portadores minoritarios y  $D_n$  es la constante de difusión. La constante de difusión se puede despejar de la movilidad usando la relación de Einstein  $D = \mu kT / e$ .

La densidad de corriente de la difusión de electrones fugados sobre la barrera se puede obtener del gradiente de la concentración de portadores en  $x=0$

$$J_n|_{x=0} = -e D_n \left. \frac{dn_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = -e D_n \frac{n_B(0)}{L_n}$$

La corriente de fuga depende de la concentración de portadores en el borde de la barrera. De esta forma, una elevada altura de la barrera es necesaria para minimizar la corriente de fuga. Es evidente que las barreras deben ser mucho mayores que  $kT$  para un confinamiento eficaz de portadores. Algunos materiales como AlGaIn/GaN o AlGaAs/GaAs tienen barreras relativamente altas y por lo tanto más corrientes de fuga sobre la barrera. Otros materiales como AlGaInP/AlGaInP emitiendo en 600-650 nm tienen menores barreras y por lo tanto tienen una fuga de portadores mayor en las barreras.

Hay que tener en cuenta que la fuga se incrementa con la temperatura. Por lo tanto, una disminución de la eficiencia radiativa de los LEDs da como resultado un incremento de temperatura. Para reducir la temperatura de la emisión, se requieren barreras elevadas. Además de las fugas de los portadores, otros efectos, como la recombinación de Shockley-Read, también contribuyen a menos eficiencia radiativa a altas temperaturas.

En las consideraciones anteriores, hemos supuesto que los electrones se difundían en la región de tipo p y han dejado de lado cualquier deriva. Sin embargo, si



la región de tipo p tiene una resistencia sustancial, la deriva de electrones no se puede despreciar. Esta deriva aumentará la corriente de electrones. Por otra parte, los contactos eléctricos han sido despreciados. La concentración de portadores minoritarios en la interfaz de contacto del semiconductor podría ser igual a cero debido a la elevada velocidad de recombinación de la superficie de dicha interfaz. La ecuación de Ebeling (1993) tiene en cuenta estos efectos. Si la distancia de contacto de la interfaz de la barrera activa se denota por  $x_p$ , la corriente de fuga es

$$J_n = -eD_n n_B(0) \left( \sqrt{\frac{1}{L_n^2} + \frac{1}{L_{nf}^2}} \coth \sqrt{\frac{1}{L_n^2} + \frac{1}{L_{nf}^2}} x_p + \frac{1}{L_{nf}} \right)$$

donde

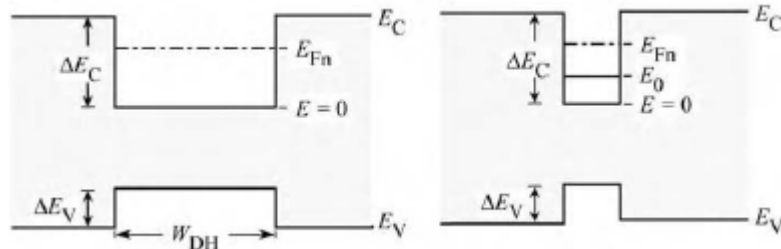
$$L_{nf} = \frac{kT}{e} \frac{\sigma_p}{J_{tot}}$$

$\sigma_p$  es la conductividad de la región revestida de tipo p y  $J_{tot}$  es la densidad de corriente total del diodo.

#### 1.7.9 DESBORDAMIENTO EN HETEROESTRUCTURAS DOBLES

El desbordamiento de portadores de la región activa en las regiones de confinamiento es otra causa de pérdida de eficiencia. El desbordamiento de portadores sucede en elevadas inyecciones de densidad de corriente. A medida que la inyección de corriente incrementa, la concentración de portadores en la región activa aumenta y se incrementa la energía de Fermi. Para densidades de corriente suficientemente altas, la energía de Fermi aumentará hasta la parte superior de la barrera. La región activa es inundada con portadores y, además, un incremento de inyección de densidad de corriente no aumentará la concentración de portadores en la

región activa. Como resultado, la intensidad óptica se satura. Para una inyección elevada de densidad de corriente, hay desbordamiento de portadores, incluso si las barreras son suficientemente altas, por lo que las fugas de portadores sobre las barreras para una inyección baja de densidad de corriente se pueden despreciar.



Vemos la energía del nivel de Fermi a la izquierda y una estructura de pozo cuántico a la derecha  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

Consideramos un LED de heteroestructura doble con una región activa de espesor  $W_{DH}$  como se muestra en la figura anterior. La ecuación de velocidad de inyección de portadores y la eliminación (por recombinación) de la región activa viene dada por

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{eW_{DH}} - Bnp$$

donde  $B$  es el coeficiente de recombinación bimolecular. Para inyecciones elevadas de densidad, es  $n=p$ . Resolviendo la ecuación anterior para bajo condiciones de estado estacionario ( $dn/dt = 0$ ), se obtiene

$$n = \sqrt{\frac{J}{eBW_{DH}}}$$

La densidad de portadores aumenta con la inyección de corriente en el dispositivo. Como resultado, la energía de Fermi aumenta. En la aproximación de alta densidad, la energía de Fermi es

$$\frac{E_F - E_C}{kT} = \left( \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{n}{N_c} \right)^{2/3}$$

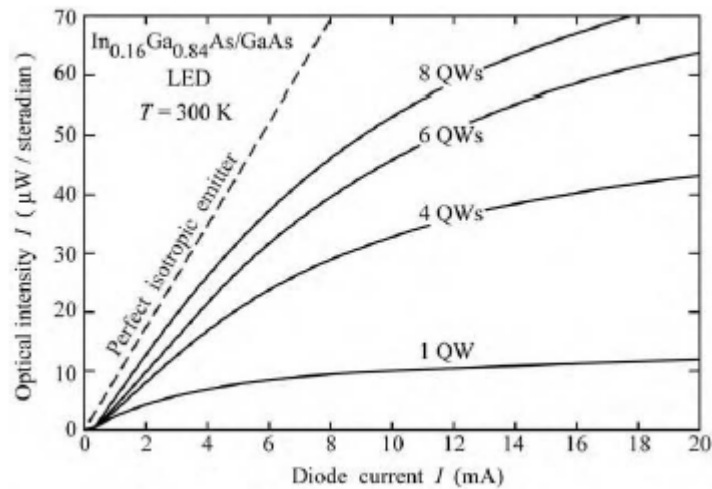
En altos niveles de inyección, la energía de Fermi incrementa y, en ocasiones, llegará a superar la barrera. En ese momento, es  $E_F - E_C = AEC$ . Utilizando este valor, la densidad de corriente en la que la región activa se desborda puede calcularse, obteniendo

$$J_{\text{overflow}} = \left( \frac{4N_c}{3\sqrt{\pi}} \right)^2 \left( \frac{\Delta E_C}{kT} \right)^3 e B W_{\text{DH}}$$

Tanto la banda de conducción como la banda de valencia pueden desbordarse en primer lugar, dependiendo de la densidad efectiva de los estados ( $N_c$ ,  $N_v$ ) y las discontinuidades de banda ( $AEC$ ,  $AEV$ ).

En general, el problema del desbordamiento de portadores es más acentuado en estructuras con un volumen bajo en la región activa. En particular, estructuras de un único pozo cuántico y regiones activas de puntos cuánticos tienen un volumen bastante pequeño. Con una cierta densidad de corriente, la región activa está llena de portadores y la inyección adicional de portadores no conllevará un aumento en la intensidad de luz emitida.

Los resultados de la estructura de un LED con uno, cuatro y seis pozos cuánticos se muestran en la siguiente figura. La intensidad de luz para una estructura con único pozo cuántico satura para niveles bajos de corriente. Cuando aumenta el número de pozos cuánticos, el nivel de corriente en el que la saturación ocurre se incrementa y la intensidad de saturación óptica aumenta también. La saturación de la intensidad de luz mostrada en la figura es debida al desbordamiento de portadores.



**Gráfica de intensidad óptica para diferentes niveles de pozo cuántico comparado con un caso ideal**  
**(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)**

El cálculo del nivel de corriente desbordada es diferente para las estructuras de pozo cuántico y las regiones activas de volumen. Para estructuras de pozo cuántico debemos emplear la densidad de estado de dos dimensiones (2D), en lugar de la densidad de estado de 3D que se utilizó en el cálculo anterior.

El nivel de Fermi en un pozo cuántico con energía  $E_0$  es

$$\frac{E_F - E_0}{kT} = \ln \left[ \exp \left( \frac{n^{2D}}{N_c^{2D}} \right) - 1 \right]$$

donde  $n^{2D}$  es la densidad de portadores en 2D por  $\text{cm}^2$  y  $N_c^{2D}$  es la densidad de efectiva de estados en 2D dada por

$$N_c^{2D} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} kT$$

Debido a que tratamos con densidades de portadores elevadas, la aproximación de alta degeneración puede emplearse como

$$E_F - E_0 = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n^{2D}$$

A continuación tenemos la ecuación de velocidad para el pozo cuántico. La ecuación de velocidad de suministro de portadores en la región activa es

$$\frac{dn^{2D}}{dt} = \frac{J}{e} - B^{2D} n^{2D} p^{2D}$$

donde  $B^{2D} \approx B/W_{QW}$  es el coeficiente de recombinación molecular para una estructura 2D. Para elevadas densidades de inyección, es  $n^{2D} = p^{2D}$ . Resolviendo la ecuación anterior para  $n^{2D}$  bajo condiciones de estado estacionario ( $dn^{2D}/dt = 0$ ), tenemos que

$$n^{2D} = \sqrt{\frac{J}{e B^{2D}}} = \sqrt{\frac{J W_{QW}}{e B}}$$

Cuando tenemos altos niveles de inyección, el nivel de energía de Fermi alcanza el borde de la barrera. En ese punto,  $E_F - E_0 = E_C - E_0$ . El uso de este valor y la posterior eliminación de  $n^{2D}$  da lugar a la densidad de corriente en la que la región activa se desborda

$$J|_{\text{overflow}} = \left[ \frac{m^*}{\pi \hbar^2} (\Delta E_C - E_0) \right]^2 \frac{e B}{W_{QW}}$$

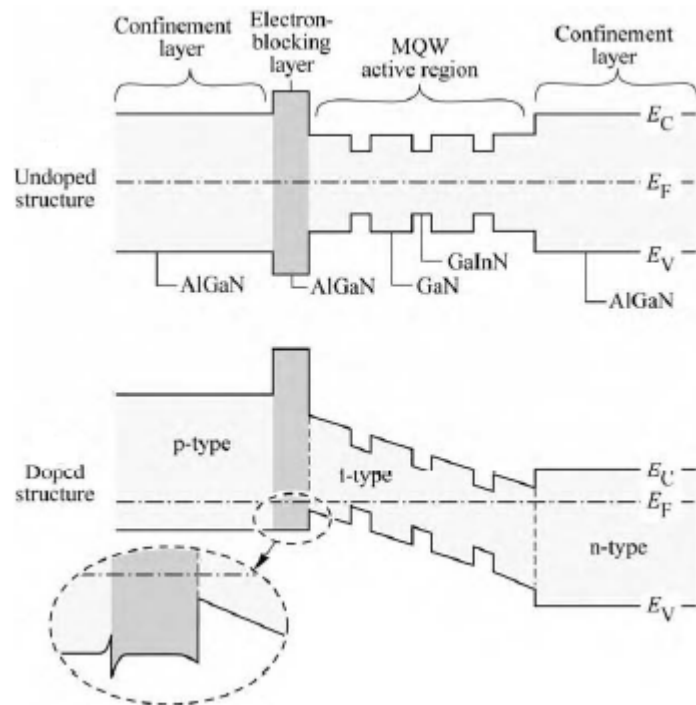
Como conclusión, vemos que el desbordamiento de la región activa es un problema potencial en las heteroestructuras dobles, así como en las estructuras de pozos cuánticos. Para evitar este problema, en los LED de alta eficiencia se deben emplear regiones activas amplias en la doble heteroestructura, o algunos pozos cuánticos que sean múltiples.

#### 1.7.10 CAPAS BLOQUEANTES DE ELECTRONES

Los portadores tienen tendencia a escapar de la región activa de los LED hacia las capas de confinamiento. La fuga de portadores puede ser alta en heteroestructuras dobles con baja altura de barrera en la interfaz entre la región activa y la de confinamiento. Además, las altas temperaturas promueven la pérdida de portadores fuera de la región activa debido al incremento en la energía térmica de los portadores.

La corriente de fuga de electrones es mayor que la corriente de fuga de huecos debido, por lo general, a la elevada constante de difusión de los electrones comparada con la de los huecos en los semiconductores. Para reducir la fuga de portadores fuera de la región activa, se utilizan capas de bloqueo de portadores. Las capas de bloqueo de portadores o bloqueadores de electrones se utilizan en muchas estructuras LED para reducir la fuga fuera de la región activa. Estas capas de bloqueo de electrones son regiones con una elevada energía de banda prohibida localizada en la interfaz entre región de confinamiento y región activa.

En la siguiente figura se muestra un diagrama sin capa de bloqueo de electrones y con capa de bloqueo, de material GaInN.



**Gráfica con modelos sin y con capa de bloqueo de electrones**  
**(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)**

El LED tiene capas de confinamiento de AlGaN y un pozo cuántico múltiple de GaInN y GaN en la región activa. En la capa de confinamiento de tipo p, en la interfaz activa de confinamiento, se incluye una capa de bloqueo de electrones de AlGaN. La primera figura muestra la estructura sin dopar, observándose que la capa de bloqueo de electrones de AlGaN crea una barrera frente al flujo de corriente tanto en la banda de conducción como en la banda de valencia.

En la segunda figura, se muestra la estructura dopada, observándose que la barrera en la banda de valencia es superada por los portadores libres, con lo cual no existe ningún obstáculo al flujo de huecos en la capa de confinamiento de tipo p, es decir, toda la banda de discontinuidad se localiza en la banda de conducción, entonces tenemos lo siguiente

$$\text{Anchura de la barrera para los electrones} = E_{C,\text{confinement}} - E_{C,\text{active}} + \Delta E_g$$

donde  $\Delta E_g$  es la diferencia de energía en la banda prohibida entre la zona de confinamiento y la zona de bloqueo de electrones.

#### 1.7.11 TENSIÓN DEL DIODO

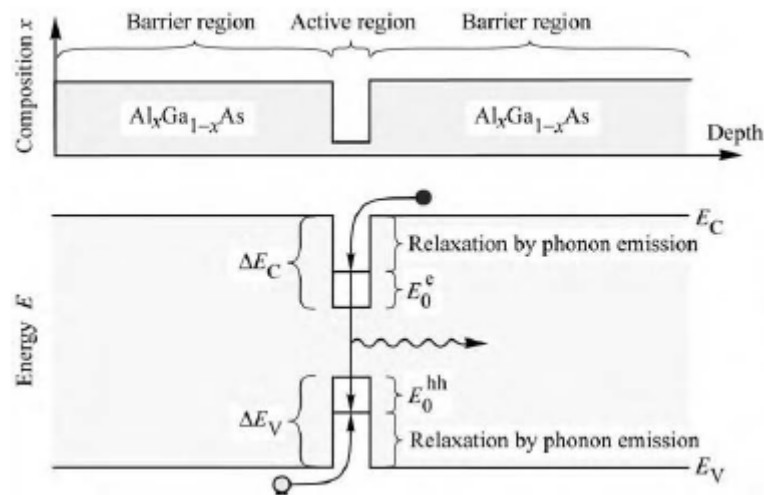
La energía que se desprende de la inyección de un electrón se transforma de energía óptica a recombinación electrón – hueco. De esta forma, para cumplir la conservación de la energía, se requiere que la tensión de conducción o tensión directa de un dispositivo emisor de luz sea igual a la energía de la banda prohibida dividida entre la carga elemental. La tensión del diodo es:

$$V = h\nu/e \approx E_g/e$$

Hay varios mecanismos que causan que la tensión directa sea ligeramente diferente de este valor. En primer lugar, si el diodo tiene una resistencia serie considerable, se traslada en una caída de tensión adicional. La resistencia adicional puede ser causada por resistencia de contacto, resistencias causadas por heteroestructuras abruptas y amplias resistencias que ocurren cuando hay bajas concentraciones de portadores. Una caída de tensión igual a  $I R_s$  se produce en el valor de la resistencia  $R_s$  de forma que aumenta la tensión directa.

En segundo lugar, la energía del portador puede perderse tras la inyección en la estructura de un pozo cuántico o una heteroestructura doble. Un ejemplo se muestra en la siguiente figura, donde se ve un fino pozo cuántico bajo condiciones de polarización directa.





**Composición y bandas de energía de una estructura de pozo cuántico**  
(Physics - Light Emitting Diodes, E.Fred Schubert)

La figura muestra que en la inyección en el pozo cuántico, el electrón pierde energía  $\Delta E_C - E_0$ , donde  $\Delta E_C$  es la discontinuidad de banda y  $E_0$  es la energía del menor estado cuántico en la banda de conducción del pozo cuántico. Del mismo modo, la pérdida de energía por huecos viene dada por  $\Delta E_V - E_0$ , donde  $\Delta E_V$  es la discontinuidad de banda y  $E_0$  es la energía del estado menor en la banda de valencia del pozo cuántico. Tras la inyección de portadores en el pozo, la energía de los portadores se disipa por emisión de fonones, es decir, por conversión de la energía de los portadores en calor.

La pérdida de energía debida a la inyección no adiabática de portadores es relevante en semiconductores con grandes discontinuidades de banda, por ejemplo GaN y otros materiales de nitrato. De esta manera, la caída de tensión a través de un LED polarizado de forma directa se calcula en la expresión:

$$V = \frac{E_g}{e} + IR_s + \frac{\Delta E_C - E_0}{e} + \frac{\Delta E_V - E_0}{e}$$

en la que el primer término del lado derecho de la ecuación es la tensión teórica mínima, el segundo se debe a la resistencia en el dispositivo y el tercero y cuarto son debidos a la inyección de portadores en la región activa.

## 2. ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Los análisis de datos de vida tradicionales, consisten en analizar los datos de tiempos de fallo obtenido bajo condiciones de funcionamiento normal con el fin de cuantificar las características de vida del producto, sistema o componente. En muchas situaciones, tales datos de vida o de fallo son muy difíciles o incluso imposibles de obtener. Las razones de esta dificultad pueden abarcar la larga vida de los productos actuales, el corto periodo entre el diseño y el lanzamiento, y el desafío de probar productos que se usan continuamente bajo condiciones normales. Dada esta dificultad, y la necesidad de observar los fallos de los productos para comprender mejor sus modos de fallo y sus características de vida, los profesionales de fiabilidad han tratado de diseñar métodos para obligar a estos productos a fallar más rápidamente de lo que harían en condiciones normales de uso. En otras palabras, han tratado de acelerar sus fallos, fallos que tendrían después de varios años, en algunos casos, en condiciones normales. Con el tiempo, los ensayos de vida acelerada se han utilizado para describir todas estas características.

Existe una variedad de métodos que utilizan tipos diferentes de esfuerzos se han denominado de forma común “ensayos de vida acelerados”. Los ensayos de vida acelerados implican la aceleración de los fallos con el único propósito de cuantificar las características de vida del producto en condiciones normales de uso, adaptando los resultados de unas condiciones extremas a unas condiciones comunes de funcionamiento, ya sea en el tipo de fallos o en el tiempo de los mismos.

En particular, y con relación a lo anterior, los ensayos acelerados de vida se pueden dividir en dos tipos: ensayos acelerados cualitativos y ensayos de vida acelerados cuantitativos. Los ensayos acelerados cualitativos, están más interesados en identificar los fallos y los modos de fallo sin tratar de hacer predicciones sobre la vida del producto en condiciones normales de uso. Los ensayos de vida acelerados

cuantitativos, están interesados en la predicción de la vida del producto (o, más concretamente, las características de vida como MBTF, etc.) en condiciones normales de uso, a partir de datos obtenidos en un ensayo de vida acelerado.

## **2.2 TIPOS DE ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS**

Como hemos visto, existen dos tipos de ensayos de vida acelerados, que vamos a ver más en detalle.

### 2.2.1 ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS CUALITATIVOS

Este tipo de ensayos sólo proporcionan información de fallo o modelo de fallos.

Básicamente, los ensayos cualitativos son realizados en pequeñas muestras con muestras sometidas a único nivel grande de esfuerzo, a una serie de esfuerzos o a un tiempo de variación de esfuerzo (es decir, ciclos de esfuerzo, de frío a calor, etc.). Si la muestra sobrevive, pasa el ensayo. De lo contrario, se tomaran las acciones apropiadas para mejorar el diseño del producto con el fin de eliminar la causa del fallo.

Los ensayos cualitativos se usan principalmente para conocer posibles modos de fallo futuros. Sin embargo, si no se diseñan de forma exhaustiva y adecuada, pueden provocar que el producto falle debido a los modos que nunca se habrían encontrado en la vida real. Un buen ensayo cualitativo es uno que revela rápidamente esos modos de fallo que se producirían durante la vida del producto en condiciones normales de uso. En general, los ensayos cualitativos no están diseñados para producir datos de la vida que puedan ser utilizados en posteriores ensayos de vida acelerados cuantitativos como se va a describir a continuación. Los ensayos cualitativos no cuantifican las características de vida (o fiabilidad) del producto en condiciones normales de uso, sin embargo, proporcionan información valiosa sobre el tipo y nivel de esfuerzo que se puede emplear durante un ensayo cualitativo posterior.

Se pueden mencionar como beneficios de este tipo de ensayos de vida acelerados, el aumento de la fiabilidad debido al descubrimiento de diferentes modelos de fallo, además de aportar información para un caso de estudio de ensayo cuantitativo, por ejemplo, posterior. Sin embargo, no aporta datos sobre la fiabilidad de un producto en condiciones normales (ciclo de vida..).

### 2.2.2 ENSAYOS DE VIDA ACELERADOS CUANTITATIVOS

A diferencia de los anteriores ensayos de vida acelerados, los cuantitativos tienen como objetivo obtener información evaluable sobre las características de vida del producto, es decir, cuantificar precisamente la fiabilidad del producto en condiciones normales. Esta información puede medir tanto la probabilidad de fallo de componentes, como mediciones de riesgo de fallos.

Normalmente, la forma de ensayo se basa en someter a condiciones de esfuerzo a los componentes de una forma coherente, con métodos como la aceleración de sobreesfuerzo y de uso, con lo que se pueden analizar los resultados mediante métodos de análisis estadísticos, de los que hablaremos más adelante.

En todos los ensayos de vida, se requiere alguna información de tiempo hasta el fallo (o tiempo de suceso) del producto ya que el fallo del producto es lo que queremos estudiar. Es decir, si queremos comprender, medir y predecir cualquier suceso, debemos observar el cómo sucede.

En la mayoría de los productos, componentes o sistemas se espera que desempeñen sus funciones correctamente durante largos periodos de tiempo. Obviamente, para que una empresa siga siendo competitiva el tiempo necesario para obtener datos sobre los tiempos de fallo deben ser considerablemente menores que la vida útil del producto. Los dos métodos de aceleración, aceleración de uso y

aceleración de sobreesfuerzo, se han diseñado para obtener datos de los tiempos de fallo a un ritmo acelerado. Para los productos que no operan de forma continua, se puede acelerar el tiempo necesario para inducir a fallos por ensayos continuos de estos productos. Esto se llama aceleración de uso, lo que sería someter a trabajo constante a un producto que, en una situación normal no lo tendría. Para productos para los que la aceleración de uso no es práctica, se puede aplicar esfuerzos en niveles en los que exceden los niveles en los que el producto se encontrará en condiciones normales de uso y usará los datos de tiempos de fallo obtenidos de esta manera para extrapolar a las condiciones de uso, lo que sería modificar las condiciones del entorno de trabajo, por ejemplo. Esto se llama aceleración de sobreesfuerzo.

#### 2.2.2.1 Aceleración de uso o velocidad de uso

Para los productos que no funcionan, generalmente, de forma continuada en condiciones normales de uso, si las unidades de ensayo funcionan continuamente, los fallos se encuentran antes que si las unidades fueran probadas en el uso normal. Por ejemplo, un microondas funciona durante cortos periodos de tiempo cada día, pero se puede acelerar un ensayo en un microondas haciéndolo funcionar más frecuentemente hasta que aparezca el fallo. Lo mismo podríamos hacer con una lavadora. Si suponemos una media de uso de la lavadora de seis horas a la semana, se podría pensar en reducir el tiempo de ensayo 28 veces para probar estas lavadoras de forma continuada. En estos casos y, por lo general en todos los de este tipo, se consideraran de mayor o menos relevancia los factores de fallo debido al encendido y apagado de los productos sometidos al ensayo.

Todos los datos que aportan este tipo de ensayos se pueden analizar con los mismos métodos que los demás ensayos.

Si ahora imaginamos cualquier producto que tenga un uso constante, entenderemos que no podemos forzar a una aceleración de uso al producto, ya que sus condiciones normales de funcionamiento ya son continuadas. Para estos casos, se utilizarían otro tipo de ensayos con el fin de obligar al sistema o producto a un

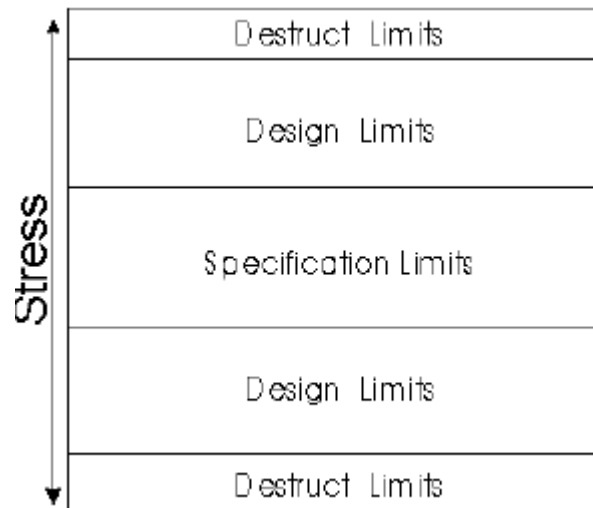
sobreesfuerzo con el fin de provocar un fallo que pueda darse realmente en su vida útil futura.

#### 2.2.2.2 Aceleración de sobreesfuerzo

Como hemos comentado, estos ensayos se basan en someter al producto objeto del ensayo a una serie de condiciones a las que no está expuesto en condiciones normales. Estas condiciones pueden ser variaciones de temperatura, humedad, presión, vibración, tensión y otras muchas, con el fin de encontrar el fallo y, después de que salga, adaptar los datos mediante las herramientas estadísticas de las que disponemos para unas condiciones normales de uso, obteniendo como resultado la vida útil hasta el fallo de ese producto.

#### 2.2.2.3 Esfuerzos y niveles de esfuerzo

Como es de imaginar, los esfuerzos a los que se somete a los productos objeto del estudio, deben ser tales que nos permitan descubrir el tiempo de fallo del mismo, pero también deben entrar dentro de unos parámetros límite en los cuáles no se produzca un fallo que no se produciría en condiciones normales. Estos límites de esfuerzo están limitados por la caracterización de diseño del producto y siempre se ha de mantener dentro de los límites del diseño, aunque fuera de los límites de las especificaciones de trabajo.



**Diagrama de niveles de esfuerzo para un componente o sistema**  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

La elección de esfuerzos y niveles de esfuerzo y el proceso de creación del ensayo es muy importante. Si se desconocen los esfuerzos o los límites, se pueden realizar múltiples pruebas con muestras pequeñas a fin de comprobar el esfuerzo adecuado y los niveles de esfuerzo. El uso adecuado de la metodología del diseño de experimentos es también crucial en este paso. Además de la selección adecuada de esfuerzo, la aplicación de esfuerzos tiene que realizarse de manera coherente, controlada y cuantificada. Los datos precisos sobre los esfuerzos aplicados, así como el comportamiento observado deben mantenerse. Es evidente que a medida que el esfuerzo utilizado en un ensayo acelerado se hace más elevado al ensayo requerido, la duración disminuye. Sin embargo, como el nivel de esfuerzo se aleja de las condiciones de uso, la incertidumbre en la adaptación de los datos al entorno real aumenta. Los intervalos de confianza proporcionan una medida de la incertidumbre en la adaptación.

### 2.2.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE VIDA DE LOS ENSAYOS ACELERADOS CUANTITATIVOS

En los análisis de datos de vida se determina, mediante el uso de distribuciones estadísticas, una estimación de vida que describe los tiempos de fallo de un producto. Estadísticamente hablando, se desea determinar el nivel de uso de la función de densidad de probabilidad del tiempo de fallo (*Probability Density Function*).

Una vez que se ha determinada la función de densidad de probabilidad, se pueden obtener los demás resultados de fiabilidad de forma sencilla. Estos parámetros característicos de los ensayos de este tipo serían porcentaje en su defecto por la garantía, evaluación de riesgos, diseño de comparación y periodo de desgaste.

En condiciones normales de uso, estos datos en forma se obtienen a través de los datos de los tiempos de fallo en tiempos reales, a la vez que se aplica, con los mismos, una distribución como la de Weibull, exponencial o distribución lognormal.

Por el contrario, en los análisis de datos de vida acelerados, tenemos que determinar el nivel de uso de la función de densidad de probabilidad de los datos de los ensayos de vida acelerados en lugar de a partir de datos de tiempos de fallo obtenidos en condiciones normales de uso. Para lograr esto, necesitamos un método que nos permita adaptar los datos obtenidos en condiciones aceleradas para llegar a una estimación de las características del nivel de uso.

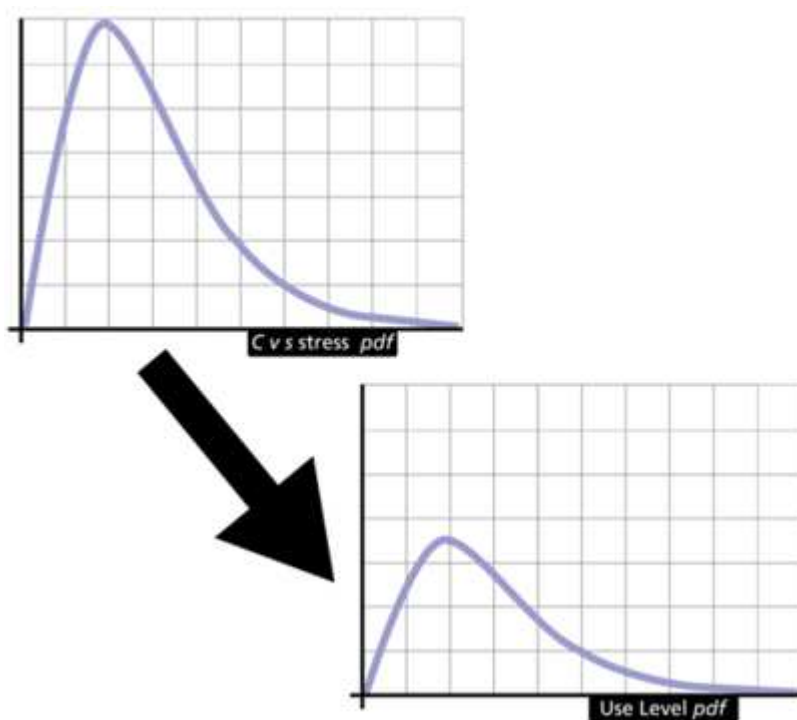
#### 2.2.3.1 Ensayos acelerados con esfuerzo constante

Para entender el proceso involucrado en la adaptación de datos de los ensayos de sobreesfuerzo sobre las condiciones normales de uso, vamos a analizar de cerca un ensayo de vida acelerado sencillo. Vamos a suponer que el componente o producto fue sometido a un nivel de esfuerzo constante y siempre el mismo. Además, supondremos que los datos de tiempos de fallo se han obtenido en este nivel de esfuerzo. Los tiempos de fallo en este nivel de esfuerzo se pueden analizar fácilmente utilizando una distribución de vida estadística. Esta función se puede utilizar para hacer predicciones y estimaciones de las medidas de vida de interés en ese nivel de esfuerzo en particular, aunque no olvidemos que el objetivo en un ensayo de vida acelerado no es la obtención de predicciones y estimaciones del nivel de esfuerzo elevado en particular sino en las condiciones normales de uso.



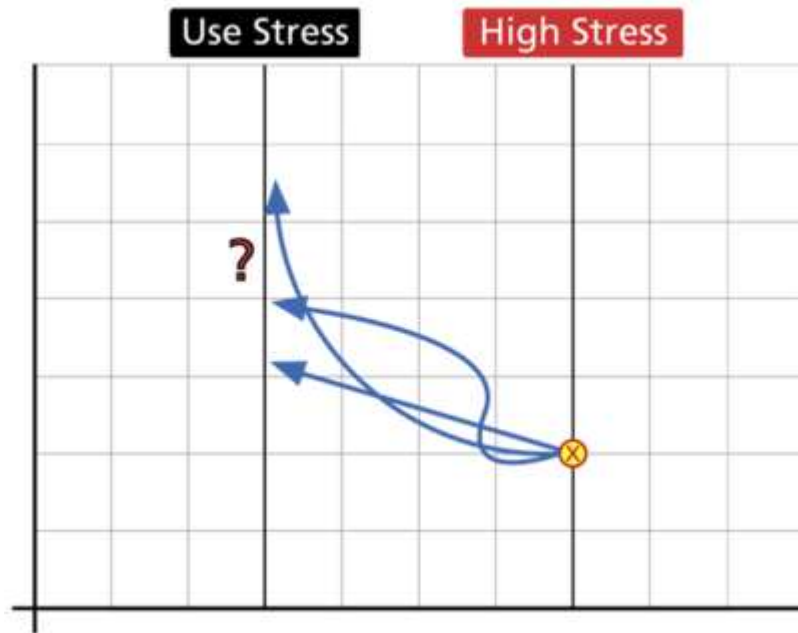
Para obtener estos resultados, tenemos que idear un método para pasar desde la función densidad de probabilidad de sobreesfuerzo hasta adaptarla a una función densidad de probabilidad de nivel de uso.

La siguiente figura ilustra un comportamiento típico de la función densidad de probabilidad en el esfuerzo elevado (o nivel de sobreesfuerzo) y la función densidad de probabilidad en el nivel de uso.



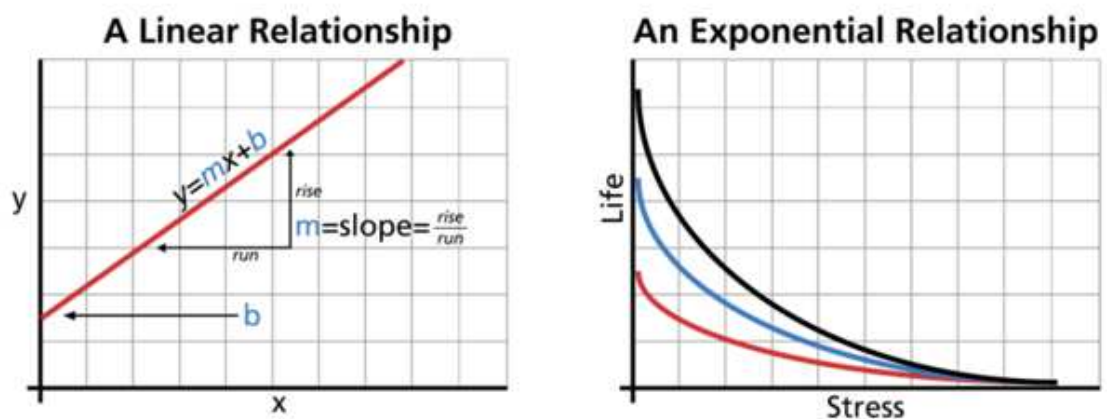
**Comparativa entre funciones de probabilidad con y sin esfuerzo añadido**  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Para simplificar aún más el escenario, vamos a suponer que la función para el producto en cualquier nivel de esfuerzo puede ser descrita por un solo punto. Se muestra un ejemplo gráfico en el siguiente gráfico:



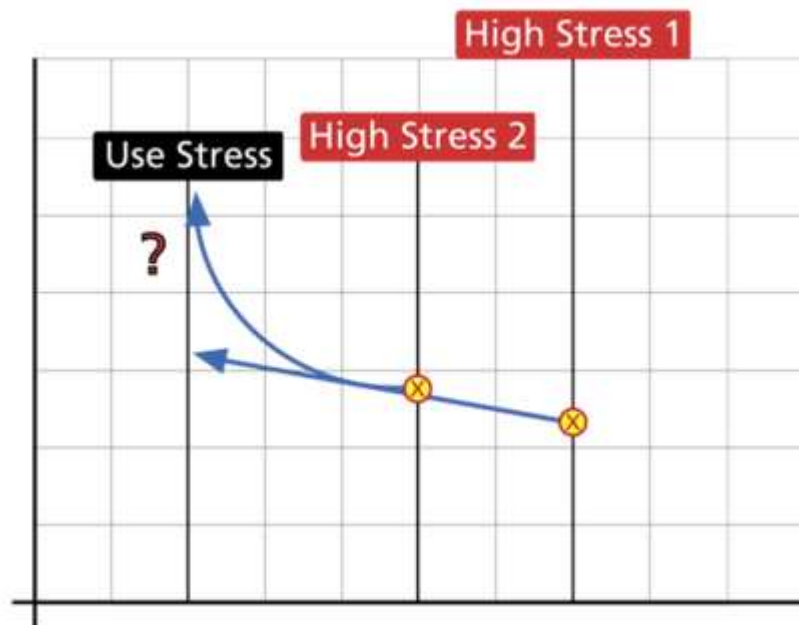
Adaptación gráfica de un punto de sobreesfuerzo en uno de esfuerzo de uso  
(www.weibull.com)

Obviamente, existen infinidad de formas de asociar un punto concreto del nivel de sobreesfuerzo al nivel de uso. Vamos a suponer que hay algún modelo o función que asocia nuestro punto desde el nivel de sobreesfuerzo hasta el nivel de uso. Este modelo o función puede escribirse en forma de ecuación matemática y a veces puede tener expresiones muy simples, por ejemplo:



Relaciones lineal y exponencial  
(www.weibull.com)

Aunque tengamos ya un modelo (lineal, exponencial, etc.) las posibilidades de asignación siguen siendo infinitas ya que dependen de los parámetros del modelo elegido o de la relación. Por ejemplo, un modelo lineal simple generaría asignaciones diferentes para cada valor de la pendiente porque podemos dibujar un número infinito de líneas a través de un punto. Si probamos muestras de nuestro producto en dos niveles diferentes de esfuerzo, podríamos empezar a ajustar el modelo a los datos y acotar los resultados. Evidentemente, cuantos más puntos tengamos, mejor se ajustará el modelo a nuestros datos.

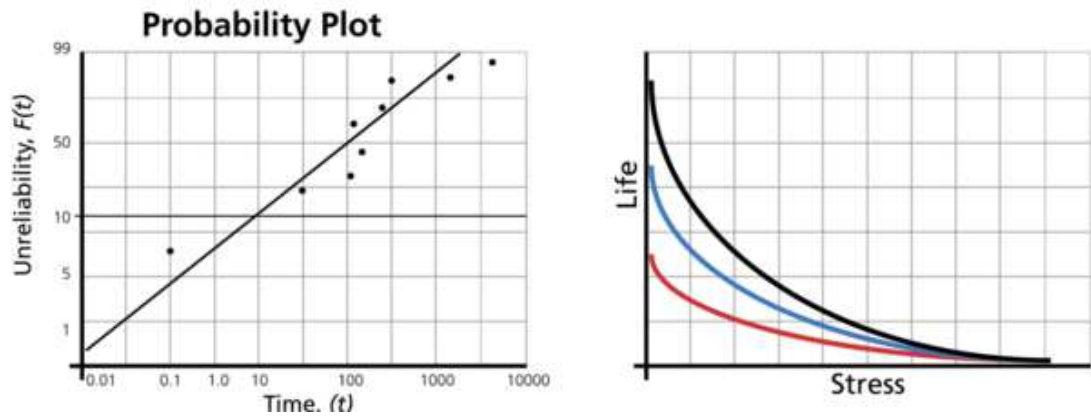


Adaptación gráfica de dos puntos de sobreesfuerzo de dos niveles en uno de esfuerzo de uso  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

#### 2.2.3.2 Distribuciones de vida y modelos de esfuerzo

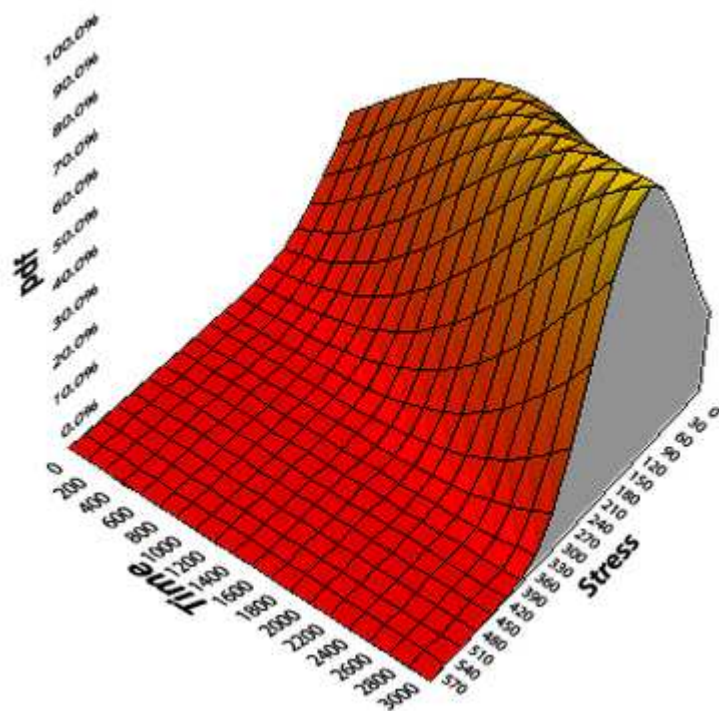
Los análisis de datos de los ensayos de vida acelerados constan de:

- una distribución de vida fundamental que describe el producto en diferentes niveles de esfuerzo
- una relación de esfuerzo-vida que cuantifica la forma en el que la distribución de vida cambia a través de los diferentes niveles de esfuerzo.



Gráficas de distribución de vida y relación esfuerzo vida  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

También podemos ver la relación de ambas como densidad de probabilidad entre tiempo y esfuerzo:



Función de densidad de probabilidad tiempo y esfuerzo  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Hemos asumido un modelo de distribución, que puede ser cualquiera en condiciones normales. Las distribuciones de vida más comunes son Weibull, exponencial y lognormal. A la vez también se utiliza una relación esfuerzo-vida, que son obtenidas de forma empírica y reflejadas en datos. A continuación se presentan varias de estas relaciones y una descripción de las más comunes.

#### 2.2.3.3 Método de análisis

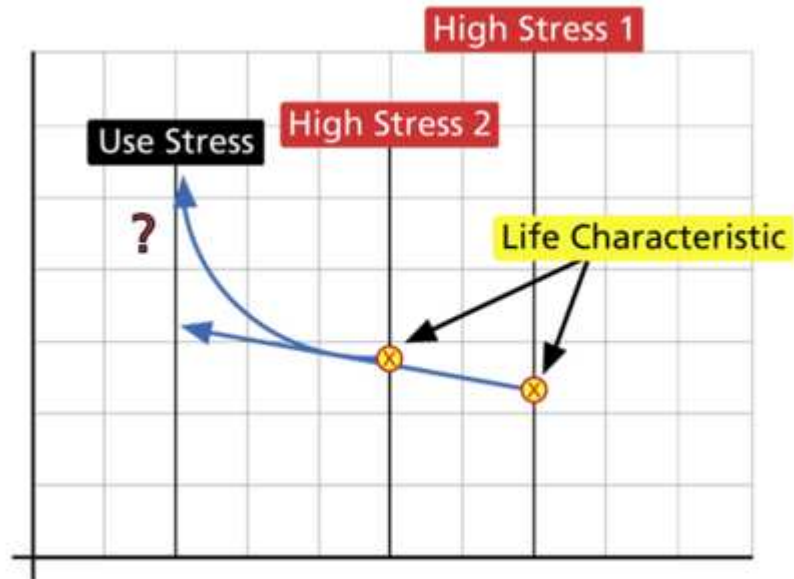
Aquí se van a describir los pasos necesarios en el análisis de datos recogidos en los ensayos de vida acelerados.

##### *2.2.3.3.1 Seleccionar una distribución de vida*

El primer paso en la realización de un análisis de datos de vida acelerado es elegir una distribución de vida apropiada. A pesar de que pocas veces es la más apropiada, la distribución exponencial se utilizó como distribución de vida fundamental, debido a su simplicidad. Las distribuciones Weibull y lognormal, que requieren cálculos más complicados, son más apropiados para la mayoría de usos.

##### *2.2.3.3.2 Seleccionar relación esfuerzo – vida*

Después de haber elegido una distribución de vida para los datos, el siguiente paso es buscar un modelo que describa un punto característico o característica de vida de la distribución desde el primer nivel de esfuerzo hasta otro.



Elección de a relación esfuerzo vida

(www.weibull.com)

Las características de vida pueden ser cualquier medida en forma de función de la vida del producto, como la media, mediana,  $R(x)$ ,  $F(x)$ , que es una función de estrés o esfuerzo. Dependiendo de la distribución de vida fundamental elegida, se considera una característica de vida diferente. Se muestran las características de vida para algunas distribuciones comunes:

Distribution	Parameters	Life Characteristic
Weibull	$\beta^*, \eta$	Scale parameter, $\eta$
Exponential	$\lambda$	Mean life ( $1/\lambda$ )
Lognormal	$\bar{T}, \sigma^*$	Median, $\check{T}$

\*Usually assumed constant

#### 2.2.3.3.3 Aproximación de parámetros

Una vez seleccionada una distribución de vida fundamental y una relación de esfuerzo - vida para ajustar el modelo a tus datos de ensayo acelerado, el siguiente paso es seleccionar un método para realizar la estimación de parámetros. En pocas

palabras, la estimación de parámetros implica ajustar un modelo a los datos y la solución para los parámetros que describan ese modelo. En nuestro caso, el modelo es una combinación de la distribución de vida y la relación esfuerzo-vida. La tarea de estimación de parámetros puede variar desde sencillos (con amplios datos, con un esfuerzo constante, una distribución simple y un modelo sencillo) hasta imposibles. Los métodos disponibles para estimar los parámetros de un modelo incluyen el método gráfico, el método de cuadrados mínimos y el método de estimación de máxima verosimilitud.

#### *2.2.3.3.4 Obtención de información de fiabilidad*

Una vez que los parámetros de la distribución de vida y la relación de esfuerzo-vida se han estimado, se puede obtener una variedad de información acerca de la fiabilidad del producto como:

- Garantía de tiempo.
- La velocidad de fallo instantánea (tasa de fallo), que marca el número de fallos que ocurren por unidad de tiempo.
- La vida media que proporciona una medida del tiempo promedio de funcionamiento hasta el fallo.
- $B(x)$ , que es el momento en que un X% de las unidades fallarán.

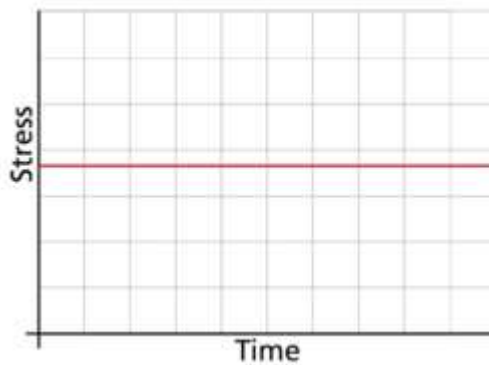
#### 2.2.3.4 Cargas de esfuerzo

Hasta ahora, en el análisis de los ensayos de vida acelerados hemos supuesto que las cargas de esfuerzo aplicadas a los componentes en los ensayos acelerados han sido una constante con respecto al tiempo. En la vida real, sin embargo, se pueden considerar los diferentes tipos de cargas al realizar un ensayo acelerado. Los ensayos de vida acelerados se pueden clasificar como un esfuerzo constante, esfuerzo por pasos, esfuerzo cíclico, esfuerzo aleatorio, etc. Estos tipos de cargas se clasifican de acuerdo a la dependencia del esfuerzo con respecto al tiempo. Hay dos posibles esquemas de carga de esfuerzo, las cargas en las que el esfuerzo es independiente del tiempo y las cargas en las que el esfuerzo es dependiente del tiempo. El tratamiento

matemático, los modelos y las hipótesis varían dependiendo de la relación del esfuerzo con el tiempo. Estos dos esquemas de carga se describen a continuación.

#### *2.2.3.4.1 Esfuerzo independiente del tiempo*

Cuando el esfuerzo es independiente del tiempo, el esfuerzo aplicado a una muestra no varía. En otras palabras, si la temperatura es el esfuerzo térmico, cada unidad es probada bajo la temperatura acelerada, por ejemplo 100°C, y los datos se guardan, es decir, como comentábamos antes, se somete a la muestra del producto a un esfuerzo constante de un tipo determinado, para este caso.



**Esfuerzo independiente del tiempo, invariable**  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Este tipo de esfuerzo tiene muchas ventajas sobre las cargas de esfuerzo dependientes del tiempo, algunas de las cuales puede ser:

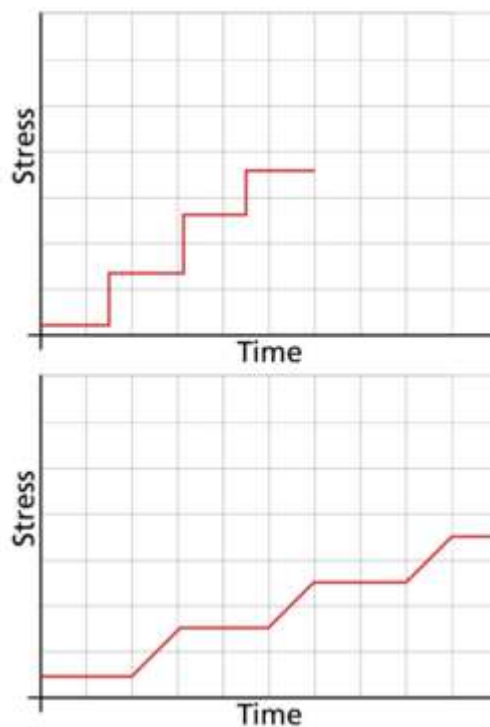
- La mayoría de los productos se supone que operan con un esfuerzo constante en condiciones normales de uso, con lo cual se acerca a un caso más real de uso.
- Es mucho más fácil de ejecutar y cuantificar un ensayo de esfuerzo constante.
- La adaptación de los resultados de un ensayo de esfuerzo constante es más precisa que la adaptación de un ensayo de esfuerzo dependiente del tiempo.

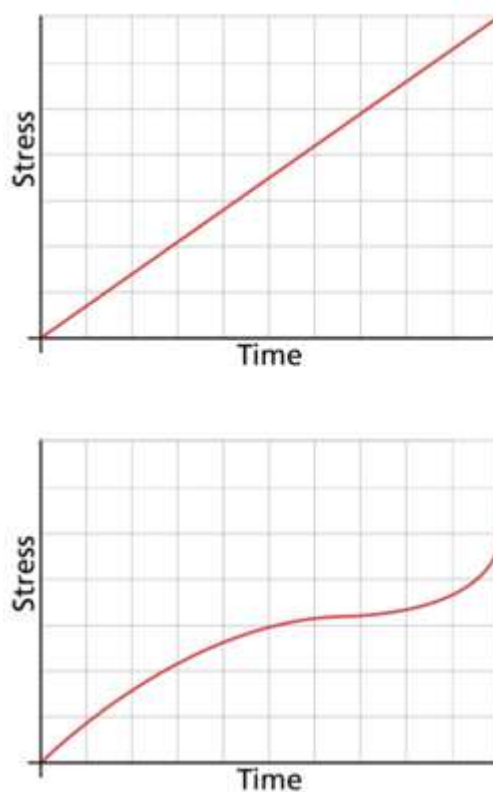


#### 2.2.3.4.2 Esfuerzo dependiente del tiempo

Cuando el esfuerzo es dependiente del tiempo, el producto está sometido a un nivel de esfuerzo no necesariamente constante, ya que está en función del tiempo. Los productos sometidos a cargas de esfuerzo dependientes del tiempo darán fallos más rápidamente. El modelo de daño acumulado permite analizar los datos de los ensayos de vida acelerados con perfiles de esfuerzo dependientes del tiempo.

Casos típicos de ensayos de esfuerzos dependientes del tiempo pueden ser el modelo de esfuerzo por pasos y el modelo de relación de esfuerzo de rampa. En estos casos, el esfuerzo se mantiene constante durante un periodo de tiempo y luego pasa a un nivel de esfuerzo diferente donde se mantiene constante otro intervalo de tiempo hasta que vuelva a pasar a otro nivel. Existen muchos tipos, aquí se muestran los anteriores:





Relaciones de paso, rampa, incremento constante y aleatorio, dependientes del tiempo  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Los dos primeros representan las funciones dependientes del tiempo por pasos y de relación de rampa y los dos últimos son dos funciones lineales con el tiempo, también son funciones dependientes del tiempo en modo continuo.

#### [2.2.3.5 Distribuciones de vida](#)

Vamos a hablar de tres distribuciones de vida usadas en los análisis de ensayos de vida acelerados. Cada distribución está caracterizada por su función densidad de probabilidad, de la que se pueden obtener la función de fiabilidad, la función de tasa de fallo o la función mediana. Las funciones se considerarán más o menos complejas en correspondencia a su función densidad de probabilidad. Todas estas funciones son dependientes de varios tipos de parámetros:

- Parámetro de escala  $\eta$ .

El parámetro de escala define donde se concentra el mayor volumen de la distribución. En el caso de la distribución normal, el parámetro de escala es la desviación estándar.

- Parámetro de forma  $\beta$ .

El parámetro de forma ayuda a definir la forma de una distribución. Algunas distribuciones como la exponencial o la normal, no tienen un parámetro de forma, ya que tienen formas predefinidas que no cambian. En el caso de la distribución normal, siempre tiene forma de campana. El efecto del parámetro de forma en una distribución

está reflejado en la forma de la función de densidad de probabilidad, la función de fiabilidad y la función de tasa de fallos.

- Parámetro de origen  $\Upsilon$ .

El parámetro de localización se utiliza para desplazar una distribución en una dirección o en la contraria. Este parámetro define el lugar origen de una distribución y puede ser positivo o negativo. En términos de distribuciones de tiempos de vida, el parámetro de localización representa un desplazamiento en el tiempo.

Para realizar una estimación de estos parámetros existen varios métodos analíticos. A continuación se describe el método de máxima verosimilitud.

#### *2.2.3.5.1 Método de máxima verosimilitud*

En estadística, el método de máxima verosimilitud (MLE) es un método de estimación de los parámetros de un modelo estadístico. Cuando se aplica a un conjunto de datos  $y$ , teniendo en cuenta un modelo estadístico, el modelo de máxima verosimilitud proporciona estimaciones de los parámetros del modelo.

El método de máxima verosimilitud corresponde a muchos métodos de estimación muy comunes. Por ejemplo, uno puede estar interesado en el tamaño de la

pata derecha delantera de rinocerontes hembras adultas, pero ser incapaz de medir la altura de cada uno de los rinocerontes en una población debido a los costes o limitaciones de tiempo. Suponiendo que las alturas siguen una distribución normal y están distribuidos con cierta media desconocida y varianza, la media y la varianza se puede estimar con MLE mientras que sólo el conocimiento de las alturas de alguna muestra de la población general. MLE podría lograr esto mediante la adopción de la media y la varianza como parámetros y la búsqueda de determinados valores de los parámetros que hacen de los resultados observados los más probables (dado el modelo).

En general, para un conjunto de datos y modelo estadístico, el método de máxima verosimilitud selecciona el conjunto de valores de los parámetros del modelo que maximiza la función de verosimilitud. Intuitivamente, esto maximiza la "relación" del modelo seleccionado con los datos observados, y para las variables aleatorias discretas que realmente maximiza la probabilidad de los datos observados en virtud de la distribución resultante.

Como hemos dicho, la evaluación por el método de máxima verosimilitud trata de encontrar los valores más probables de los parámetros de la distribución en un conjunto de datos dado, maximizando el valor de lo que se conoce como la "función de verosimilitud". La función de verosimilitud se basa en la función densidad de probabilidad para una distribución dada. Si consideramos una función de densidad de probabilidad genérica:

$$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

Donde  $x$  representa los datos (tiempo hasta el fallo), y  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  son los parámetros que se estimarán y  $k$  el número de parámetros a evaluar. Para un conjunto de datos de observación, la función de verosimilitud es un producto de la función de la densidad de la probabilidad, con un elemento por cada punto en el conjunto de datos

$$L(x_1, x_2, \dots, x_N | \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = L = \prod_{i=1}^N f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$R$  es el número de observaciones independientes que corresponden al tiempo de fallo en un análisis de vida,  $x_i$  es el  $i$ -ésimo tiempo de fallo. Es más sencillo trabajar con la función logarítmica, la cual se expresa de la siguiente forma:

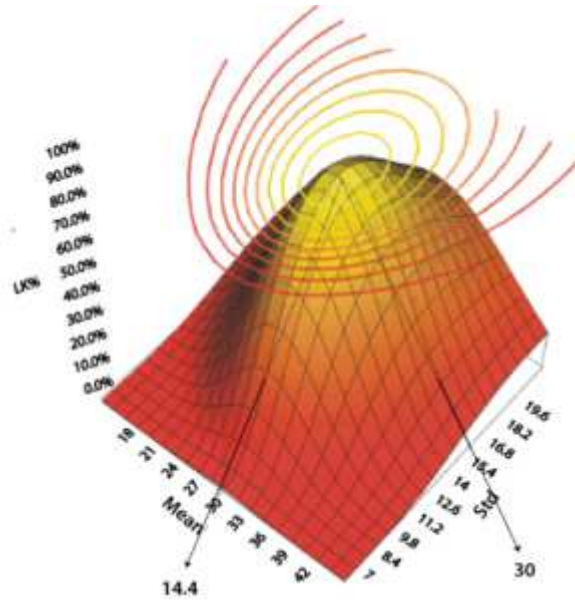
$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^N \ln f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

Por lo tanto para encontrar los valores de los parámetros  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  se debe maximizar  $L$  ó  $\Lambda$ . Esto se hace comúnmente tomando la derivada parcial de la ecuación de  $\Lambda$  para cada uno de los parámetros e igualándolos a cero.

$$\frac{\partial(\Lambda)}{\partial \theta_j} = 0, j = 1, 2, \dots, k$$

Esto da como resultado un número de ecuaciones con un igual número de variables, las cuales pueden resolverse simultáneamente. Si existen las soluciones cerradas para las derivadas parciales la solución puede ser relativamente simple. En las situaciones donde no se da el caso, se necesitan emplear algunos métodos numéricos más complejos.

Por último comentar que se pueden representar de forma gráfica los resultados de MLE de forma que los más probables son los que se representan en el punto más alto de la misma, es decir, los puntos o zona de valores que maximizan la función de máxima verosimilitud.



**Función de máxima verosimilitud, los puntos de arriba representan los más probables**  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

#### 2.2.3.5.2 Distribución exponencial

La distribución exponencial es una distribución muy usada en ingeniería de fiabilidad. Debido a su simplicidad, ha sido ampliamente utilizada incluso en los casos en los que no se aplica. La distribución exponencial se usa para describir las unidades que tienen tasa de fallo constante.

La función densidad de probabilidad de un único parámetro exponencial está dado por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \frac{1}{m} e^{-\frac{1}{m}t}, \quad t \geq 0, \lambda > 0, m > 0$$

- $\lambda$  = tasa de fallo constante, en fallos por unidad de medida.
- $\lambda = 1/m$ .
- $m$  = tiempo medio entre fallos.
- $T$  = tiempo de funcionamiento.

Esta distribución requiere la estimación de un solo parámetro,  $\lambda$ , para su uso.

A continuación se presenta un resumen de las propiedades estadísticas para una distribución exponencial de un parámetro:

#### · Media o MTTF

La media, o tiempo medio entre fallos (MTTF) de la distribución exponencial de un parámetro es:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \int_{\gamma}^{\infty} t \cdot f(t) dt \\ &= \int_{\gamma}^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt \\ &= \gamma + \frac{1}{\lambda} = m\end{aligned}$$

Es importante mencionar que cuando  $\gamma = 0$  el MTTF es la inversa de la tasa de fallo constante en una distribución exponencial. Esto sólo se cumple para una distribución de este tipo, la mayoría de las distribuciones no tienen tasas de fallos constantes, con lo cual, esta aproximación que sirve para las demás propiedades de esta distribución no será aplicable en las demás distribuciones.

#### Mediana

La mediana  $\check{T}$  de la distribución exponencial de un parámetro es:

$$\check{T} = \gamma + \frac{1}{\lambda} \cdot 0.693$$

#### Moda

El modo de la distribución exponencial de un parámetro es:

$$\tilde{T} = \gamma$$

#### Desviación estándar

La desviación estándar viene dada:

$$\sigma_T = \frac{1}{\lambda} = m$$

### Función de fiabilidad

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{m}}$$

### Función exponencial acumulada

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^{t-\gamma} f(x)dx$$

$$R(t) = 1 - \int_0^{t-\gamma} \lambda e^{-\lambda x} dx = e^{-\lambda(t-\gamma)}$$

### Fiabilidad condicional

La ecuación nos da la fiabilidad en función de t, habiendo obtenido T horas de periodo exitoso de funcionamiento.

$$R(t|T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\lambda(T+t-\gamma)}}{e^{-\lambda(T-\gamma)}} = e^{-\lambda t}$$

Que dice que la fiabilidad para un ensayo llevado a cabo después de que el componente o equipo ya ha acumulado horas de operación desde cero, es sólo una función de la duración del ensayo, y no una función de la edad en el comienzo del mismo.

### Función de fiabilidad exponencial

$$R(t_R) = e^{-\lambda(t_R-\gamma)}$$

$$\ln[R(t_R)] = -\lambda(t_R - \gamma)$$

$$t_R = \gamma - \frac{\ln[R(t_R)]}{\lambda}$$



**Funcion de la tasa de fallo**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}}{e^{-\lambda(t-\gamma)}} = \lambda = \text{constant}$$

**2.2.3.5.3 Distribución Weibull**

La distribución de Weibull es una de las distribuciones más utilizadas en fiabilidad debido a las muchas formas que alcanza para varios valores de  $\beta$  (pendiente). Se utiliza para medir la dureza o robustez de un material y su tiempo de fallo.

Para esta distribución vamos a tomar la aproximación de 2 parámetros, en la que el factor de aproximación será cero, simplemente por su ínfimo valor proporcional, para simplificar el cálculo, aunque en la realidad no lo sea.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Al igual que con la distribución anterior, vamos a ver sus propiedades estadísticas

**Media o MTTF**

$$\bar{T} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

Donde  $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$  es la función gamma aproximada al valor  $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ , con lo cual, considerando la definición de gamma

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx$$

La ecuación final de la Media quedaría, con la aproximación que comentamos antes:

$$\bar{T} = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

#### Mediana

$$\check{T} = \gamma + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}$$

#### Moda

$$\tilde{T} = \gamma + \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

#### Desviación estándar

$$\sigma_T = \eta \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}$$

#### Función de fiabilidad condicional de Weibull

$$R(t|T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}}$$

$$R(t|T) = e^{-\left[\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]}$$

#### Margen de fiabilidad de vida de Weibull

$$T_R = \gamma + \eta \cdot \{-\ln(R)\}^{\frac{1}{\beta}}$$

#### Función margen de fallo Weibull

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

#### 2.2.3.5.4 Distribución lognormal

La distribución lognormal es de uso general para el análisis de fiabilidad general, los ciclos hasta fallo en la fatiga, la resistencia de los materiales y las variables de cargas en el diseño probabilístico. Cuando el logaritmo del tiempo hasta el fallo es una distribución normal decimos que los datos siguen una distribución lognormal.

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'}\right)^2}$$

$$f(t) \geq 0, t > 0, \sigma' > 0$$

$$t' = \ln(t)$$

En la que  $\mu'$  es la media de los logaritmos naturales del tiempo hasta el fallo y  $\sigma'$  es la desviación estándar de los logaritmos naturales de los tiempos hasta el fallo.

Como en las anteriores, vamos a ver las propiedades estadísticas:

#### Media o MTTF

$$\mu = e^{\mu' + \frac{1}{2}\sigma'^2}$$

Cruzando parámetros con la media y desviación, la podemos escribir como función de la Media:

$$\mu' = \ln(\bar{T}) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2}{\bar{T}^2} + 1\right)$$

**Mediana**

$$\check{T} = e^{\mu'}$$

**Moda**

$$\tilde{T} = e^{\mu' - \sigma'^2}$$

**Desviación estándar**

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2\mu' + \sigma'^2}\right) - \left(e^{\sigma'^2} - 1\right)}$$

$$\sigma' = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_T^2}{\tilde{T}^2} + 1\right)}$$

**Función de fiabilidad lognormal**

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'}\right)^2} dx$$

**Función de fiabilidad condicional lognormal**

$$R(t|T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{\int_{\ln(T+t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'}\right)^2} ds}{\int_{\ln(T)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'}\right)^2} dx}$$

**Función de fiabilidad de vida lognormal**

$$R_t = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'}\right)^2} dx$$

**Función margen de fallo lognormal**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{t \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2}}{\int_{t'}^{\infty} \frac{1}{x \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx}$$

2.2.3.6 Relación de Arrhenius

El modelo de esfuerzo vida de Arrhenius es uno de los más utilizados en ensayos de vida acelerados. Se utiliza comúnmente cuando la variable de aceleración es la temperatura. Se deriva de la ecuación de velocidad de reacción de Arrhenius propuesta por el químico-físico sueco Svandte Arrhenius en 1887.

$$R(T) = A e^{-\frac{E_A}{K \cdot T}}$$

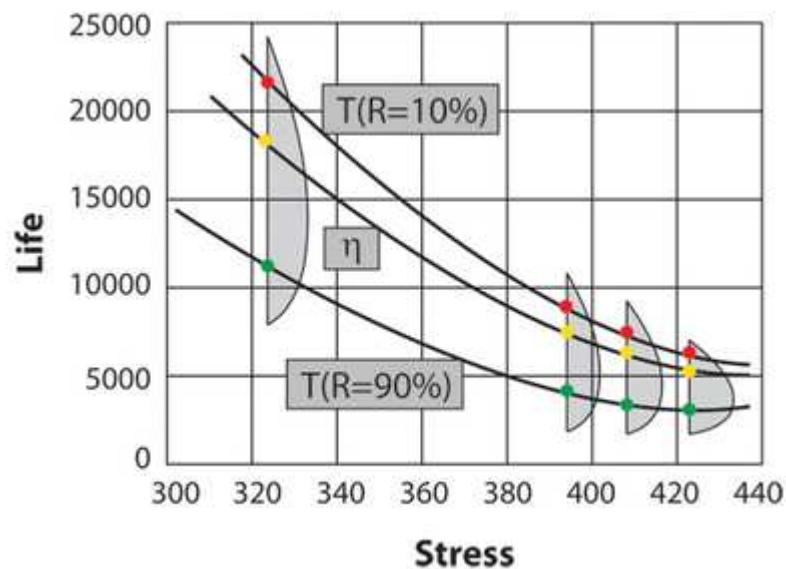
En la que R es la velocidad de reacción, A sería una constante no térmica desconocida, Ea, la velocidad de activación en eV, K es la constante de Boltzman y T es la temperatura absoluta en K.

La energía de activación es la energía necesaria para que una molécula participe en la reacción o dicho de otra forma, es una medida del efecto que la temperatura tiene sobre la reacción.

El modelo de esfuerzo vida de Arrhenius considera que el nivel de vida es proporcional a la inversa de la velocidad de reacción en el proceso, y viene dado por:

$$L(V) = C e^{\frac{B}{V}}$$

En la que  $L$  representa una medida de vida cuantificable (media, mediana..),  $V$  representa el nivel de esfuerzo (para temperaturas con valores absolutos en K),  $C$  es uno de los parámetros del modelo a determinar, ( $C > 0$ ) y  $B$  es otro parámetro del modelo a determinar.

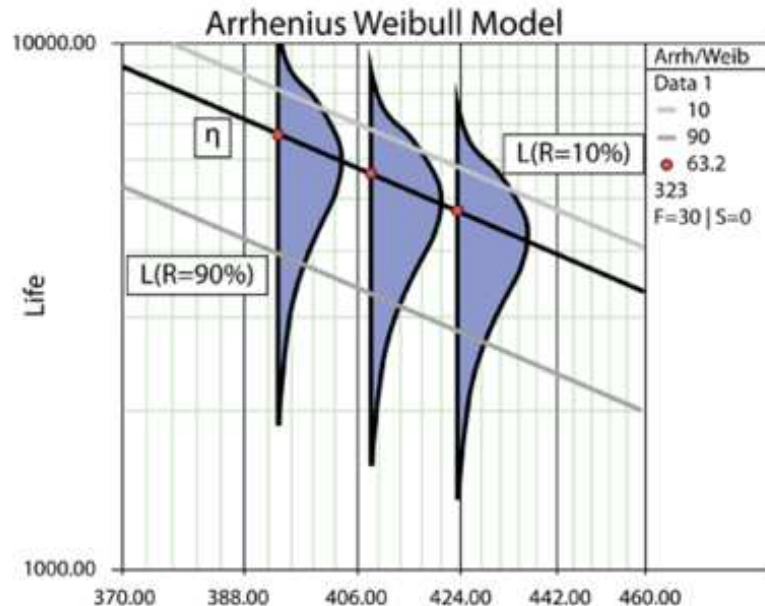


Gráfica de relación de Arrhenius en diferentes casos, suponiendo distribución Weibull  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Como la relación de Arrhenius es un modelo basado en física dependiente de temperatura, el modelo solo se utiliza para ensayos acelerados de temperatura.

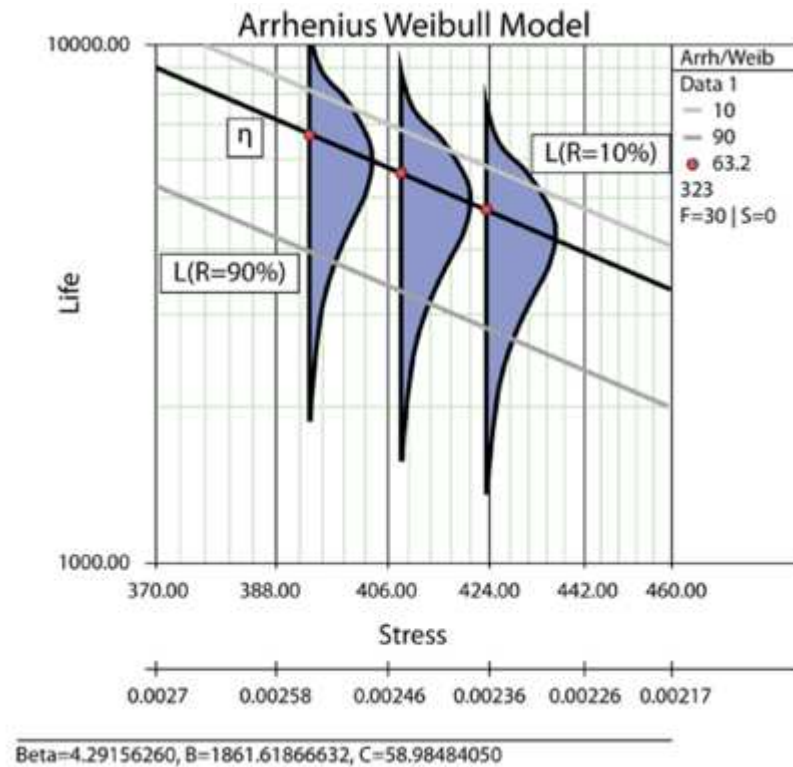
La relación de Arrhenius se puede linealizar y dibujar en una gráfica de esfuerzo vida, también llamada gráfica de Arrhenius. La relación es lineal tomando el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación de esfuerzo vida de Arrhenius:

$$\ln(L(V)) = \ln(C) + \frac{B}{V}$$



Gráfica de Arrhenius para una distribución Weibull  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

En esta ecuación linealizada  $\ln(C)$  es la intersección de la línea y  $B$  es la pendiente de la línea. Hay que tener en cuenta que la inversa del esfuerzo, y no del esfuerzo, es la variable. En la gráfica anterior, la vida se representa respecto al esfuerzo y no respecto al esfuerzo inverso. Esto es porque la ecuación está representada en una escala de reciprocidad. En esa escala, la pendiente  $B$  parece ser negativa a pesar de que tiene un valor positivo. Esto es porque  $B$  es, en realidad, la pendiente inversa de reciprocidad de esfuerzo y no la pendiente del esfuerzo. La reciprocidad del esfuerzo disminuye a medida que el esfuerzo aumenta (  $1/V$  disminuye de valor a medida que  $V$  va aumentando). Podemos verlo en el siguiente gráfico:



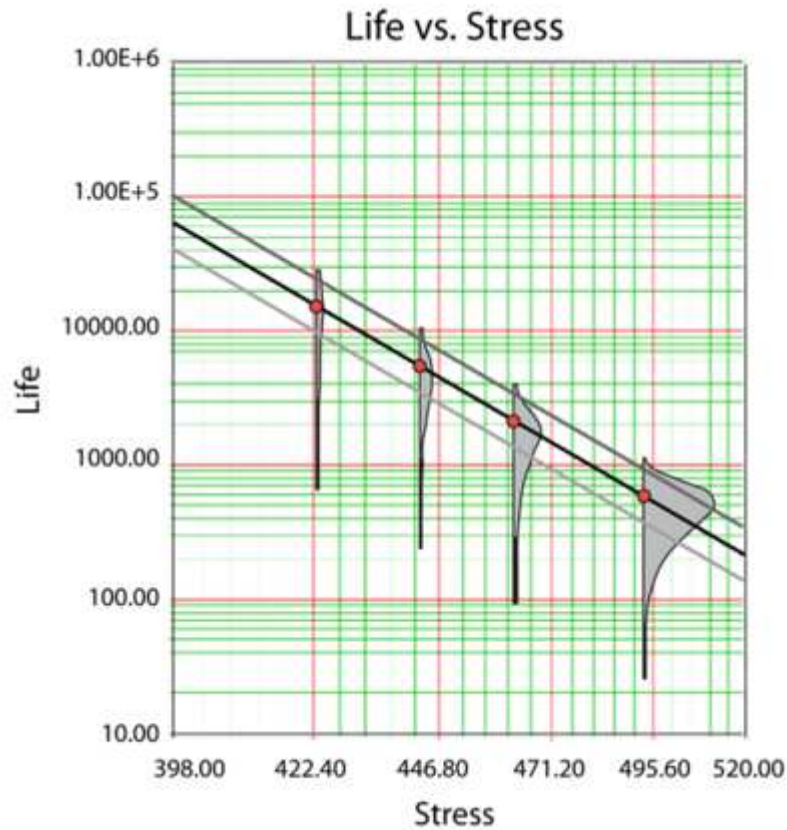
Gráfica de Arrhenius con las dos escalas

(www.weibull.com)

La relación de Arrhenius se representa en una escala de reciprocidad por razones prácticas. Por ejemplo, en la figura anterior es más conveniente encontrar la vida que corresponde a un nivel de esfuerzo de 370°K que tomar primero el recíproco de 370°K (0,0027) y luego buscar la vida correspondiente.

Las áreas sombreadas que se muestran en la gráfica son las funciones impuestas en cada nivel de esfuerzo. De estas funciones impuestas de densidad de probabilidad, se puede ver el rango de vida en cada nivel de esfuerzo del ensayo, así como la dispersión. En la siguiente figura vemos un caso en el cual hay una dispersión significativa en la vida de cada nivel de esfuerzo del ensayo.





Dispersión de vida a diferentes niveles de esfuerzo

(www.weibull.com)

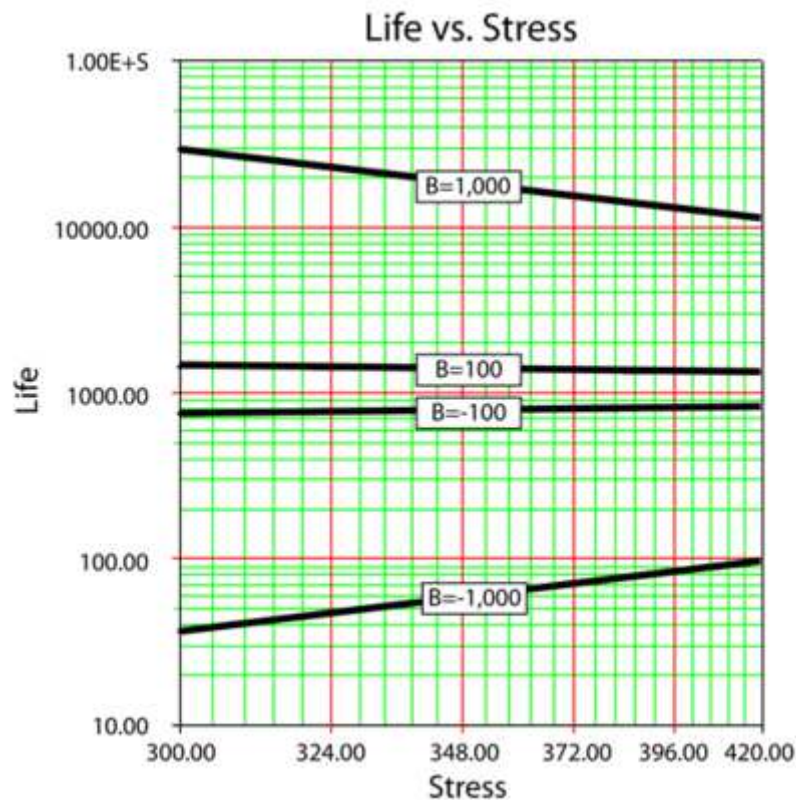
#### 2.2.3.6.1 Energía de activación y parámetro B

En función de la aplicación y de dónde el esfuerzo es exclusivamente térmico, podemos sustituir el parámetro B por:

$$B = -\frac{E_A}{K} = -\frac{\text{activation energy}}{\text{Boltzman's constant}} = -\frac{\text{activation energy}}{8.623 \times 10^{-5} \text{eVK}^{-1}}$$

Tenga en cuenta que en esta fórmula, la energía de activación  $E_a$  debe ser conocida antes. Si la energía de activación es conocida entonces sólo hay un parámetro del modelo que queda por determinar, C. Debido a que en la mayoría de situaciones de la vida real es muy poco probable que esto suceda, en todas las formulaciones posteriores supondremos que la energía de activación es desconocida y trataremos al parámetro B como uno de los parámetros del modelo. B tiene las

mismas propiedades que la energía de activación. Es decir,  $B$  es una medida del efecto que el esfuerzo (por ejemplo la temperatura) tiene en la vida. Cuanto mayor sea el valor de  $B$ , mayor será la dependencia de la vida en el esfuerzo específico. El parámetro  $B$  también podría tomar valores negativos, en ese caso, la vida aumenta con el aumento del esfuerzo. Un ejemplo de este comportamiento podría ser una bombilla, en la cual una baja temperatura es un nivel de esfuerzo mucho mayor que una temperatura alta.



Variaciones del parámetro  $B$   
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

#### 2.2.3.6.2 Factor de aceleración de Arrhenius

En la mayoría de las prácticas, se utiliza el factor de aceleración térmica para referirse al margen de vida entre el nivel de uso y un nivel de uso de esfuerzo alto:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}}$$

Para el modelo de Arrhenius, este factor sería:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{C e^{\frac{B}{V_u}}}{C e^{\frac{B}{V_A}}} = \frac{e^{\frac{B}{V_u}}}{e^{\frac{B}{V_A}}} = e^{\left(\frac{B}{V_u} - \frac{B}{V_A}\right)}$$

Con lo cual, si B lo conocemos anteriormente (utilizando la energía de activación), la energía de activación que se considera sólo regula esta factor de aceleración.

#### 2.2.3.6.3 Modelo de Arrhenius - Exponencial

La función densidad de probabilidad de la distribución exponencial de un parámetro es:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Es sencillo demostrar que la media de vida viene dada por:

$$\lambda = \frac{1}{m}$$

Con lo cual nos quedaría

$$f(t) = \frac{1}{m} e^{-\frac{t}{m}}$$

La relación de Arrhenius-Exponencial puede obtenerse sustituyendo el parámetro m por L(V), al final tenemos la ecuación siguiente metiéndolo en los campos correspondientes

$$m = L(V) = Ce^{\frac{B}{V}}$$

$$f(t, V) = \frac{1}{Ce^{\frac{B}{V}}} \cdot e^{-\frac{1}{Ce^{\frac{B}{V}}} \cdot t}$$

Las propiedades estadísticas son las siguientes:

#### Media o MTTF

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t, V) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{1}{Ce^{\frac{B}{V}}} e^{-\frac{t}{Ce^{\frac{B}{V}}}} dt = Ce^{\frac{B}{V}}$$

#### Mediana

$$\check{T} = 0.693 \cdot Ce^{\frac{B}{V}}$$

#### Moda

$$\tilde{T} = 0$$

#### Derivación estándar

$$\sigma_T = Ce^{\frac{B}{V}}$$

#### Función de fiabilidad Arrhenius-Exponencial

Esta función viene dada por:

$$R(T, V) = e^{-\frac{T}{Ce^{\frac{B}{V}}}}$$

Esta función viene determinada por la distribución acumulativa de Arrhenius – Exponencial:

$$R(T, V) = 1 - Q(T, V) = 1 - \int_0^T f(T, V) dT$$

Y también por

$$R(T, V) = 1 - \int_0^T \frac{1}{C e^{\frac{B}{V}}} e^{-\frac{T}{C e^{\frac{B}{V}}}} dT = e^{-\frac{T}{C e^{\frac{B}{V}}}}$$

#### Fiabilidad condicional

$$R(T, t, V) = \frac{R(T + t, V)}{R(T, V)} = \frac{e^{-\lambda(T+t)}}{e^{-\lambda T}} = e^{-\frac{t}{C e^{\frac{B}{V}}}}$$

#### Fiabilidad de vida

La fiabilidad de vida o duración para un objetivo de fiabilidad determinado  $t_R$  viene dado

$$R(t_R, V) = e^{-\frac{t_R}{C e^{\frac{B}{V}}}}$$

$$\ln[R(t_R, V)] = -\frac{t_R}{C e^{\frac{B}{V}}}$$

O también:

$$t_R = -C e^{\frac{B}{V}} \ln[R(t_R, V)]$$

Para la estimación de los parámetros se suele utilizar el método de máxima verosimilitud, cuya función logarítmica es:

$$\ln(L) = \Lambda = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln [\lambda e^{-\lambda T_i}] - \sum_{i=1}^S N'_i \lambda T'_i + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \ln [\Phi(z''_{Ri}) - \Phi(z''_{Li})]$$

En la que

$$R''_{Li} = e^{-\lambda T''_{Li}}$$

$$R''_{Ri} = e^{-\lambda T''_{Ri}}$$

Y el resto de los parámetros:

$F_e$  es el número de grupos de puntos exactos de tiempos de fallo.

$N_i$  es el número de tiempos de fallo en el  $i^{th}$  grupo de tiempos de fallo.

$\lambda$  es la tasa de fallo, desconocida.

$T_i$  es el tiempo exacto de fallo del grupo  $i^{th}$ .

$S$  es el número de grupos de puntos de fallo de suspensión.

$N'_i$  es el número de suspensiones en el  $i^{th}$  grupo de datos de suspensiones.

$T'_i$  es el tiempo del  $i^{th}$  grupo de suspensión.

$FI$  es el número de intervalos de grupos de datos.

$N''_i$  es el número de intervalos en el  $i^{th}$  grupo de datos de intervalos.

$T''_{Li}$  es el comienzo del  $i^{th}$  intervalo.

$T''_{Ri}$  es el final del  $i^{th}$  intervalo.

Si ahora cruzamos el modelo de Arrhenius – Exponencial con el método de máxima verosimilitud, obtenemos la expresión:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln \left[ \frac{1}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} e^{-\frac{1}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} T_i} \right] - \sum_{i=1}^S N'_i \frac{1}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} T'_i + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \ln[R''_{Li} - R''_{Ri}]$$

En la cual:

$$R''_{Li} = e^{-\frac{T''_{Li}}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}}}$$

$$R''_{Ri} = e^{-\frac{T''_{Ri}}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}}}$$

La solución, estimación de parámetros, la obtendremos encontrando el valor de  $\hat{B}$  y de

$\hat{C}$ , con  $\frac{\partial \Lambda}{\partial B} = 0$  con  $\frac{\partial \Lambda}{\partial C} = 0$  donde la definición de cada una de las dos es:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial B} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{F_e} N_i \left( \frac{T_i}{V_i e^{\frac{B}{V_i}}} - \frac{C}{V_i} \right) + \frac{1}{C} \sum_{i=1}^S N'_i \frac{T'_i}{V_i e^{\frac{B}{V_i}}} + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{T''_{Li} R''_{Li} - T''_{Ri} R''_{Ri}}{(R''_{Li} - R''_{Ri}) C V_i e^{\frac{B}{V_i}}}$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial C} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{F_e} N_i \left( \frac{T_i}{C e^{\frac{B}{V_i}}} - 1 \right) + \frac{1}{C^2} \sum_{i=1}^S N'_i \frac{T'_i}{e^{\frac{B}{V_i}}} + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{T''_{Li} R''_{Li} - T''_{Ri} R''_{Ri}}{(R''_{Li} - R''_{Ri}) C^2 e^{\frac{B}{V_i}}}$$

#### 2.2.3.6.4 Modelo de Arrhenius - Weibull

Para este modelo, podemos ver que la función densidad de probabilidad de dos parámetros viene dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

El parámetro de escala o vida característica de las distribuciones Weibull es  $\eta$

La función densidad de probabilidad del modelo puede obtenerse si hacemos que:

$$\eta = L(V)$$

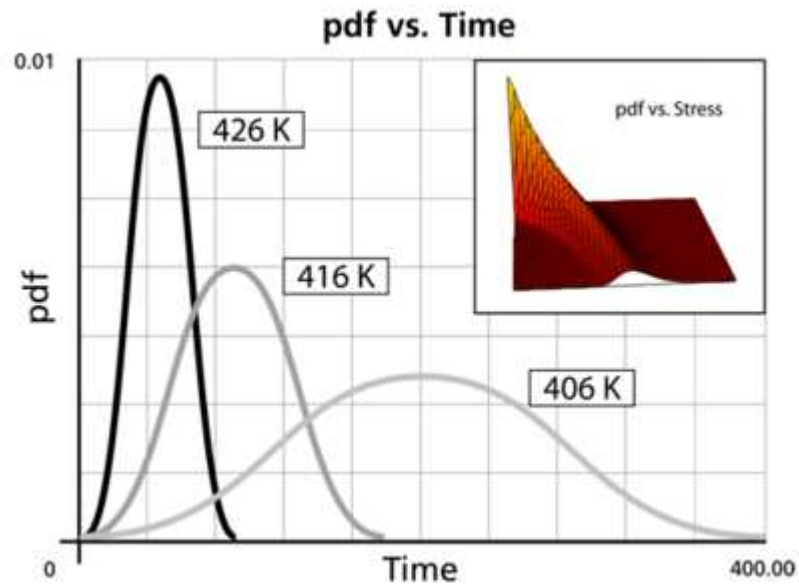
$$\eta = L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}}$$

Cruzándolo con la ecuación de distribución Weibull de dos parámetros:

$$f(t, V) = \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \left( \frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta}}$$

Como nos podemos imaginar, la función densidad de probabilidad en los niveles de esfuerzo más bajos se estira más hacia la derecha, con un parámetro de escala elevado, mientras que su forma continua siendo la misma. Este comportamiento se observa cuando el parámetro B del modelo de Arrhenius es mayor que cero.





Función densidad de probabilidad con diferentes niveles de esfuerzo

(www.weibull.com)

Una gran ventaja de utilizar este método de distribución Weibull recae en la flexibilidad que tiene para tomar diferentes formas.

Ahora vamos a ver las propiedades estadísticas del modelo:

#### Media o MTTF

$$\bar{T} = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

donde  $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$  es la función gamma con valor  $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

#### Mediana

$$\check{T} = C \cdot e^{\frac{B}{V}} (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}$$

**Moda**

$$\tilde{T} = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

**Desviación estándar**

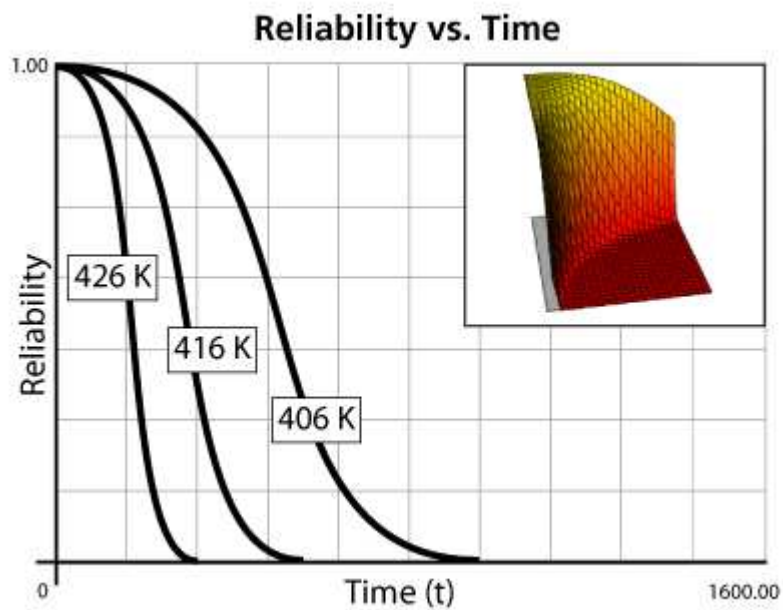
La desviación  $\sigma_T$  viene dada por:

$$\sigma_T = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)\right)^2}$$

**Fiabilidad de vida**

$$R(T, V) = e^{-\left(\frac{T}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}}\right)^{\beta}}$$

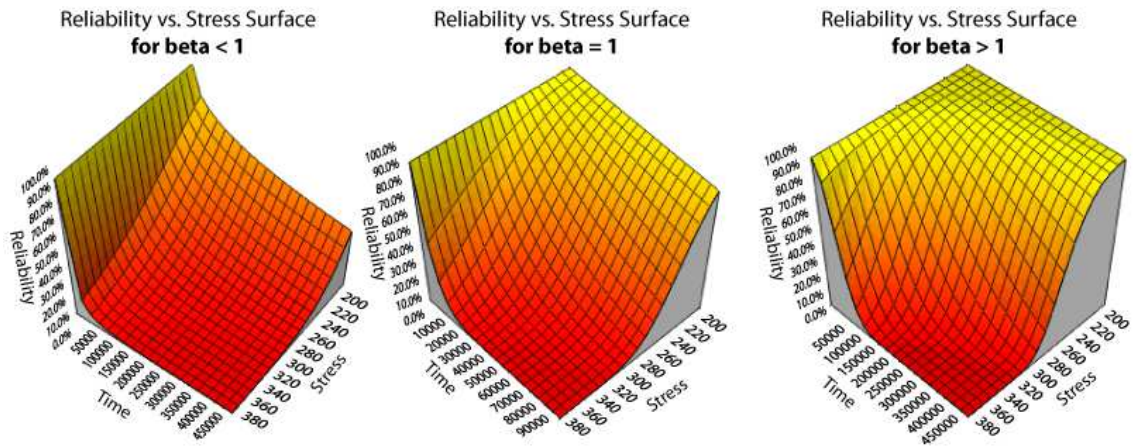
Si el parámetro B es mayor que cero, la fiabilidad aumenta a la vez que el nivel de esfuerzo disminuye.



Función de fiabilidad a diferentes niveles de esfuerzo

([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la función de fiabilidad de vida en función del parámetro  $\beta$  y el nivel de esfuerzo, que es lo que se contempla dentro del modelo de Arrhenius – Weibull:



Función de fiabilidad con valores de beta diferentes  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

#### Función fiabilidad condicional

A un determinado nivel de esfuerzo viene dada por

$$R(T, t, V) = \frac{R(T + t, V)}{R(T, V)} = \frac{e^{-\left(\frac{T+t}{\eta}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta}}$$

O bien por

$$R(T, t, V) = e^{-\left[\left(\frac{T+t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}}\right)^\beta - \left(\frac{T}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}}\right)^\beta\right]}$$

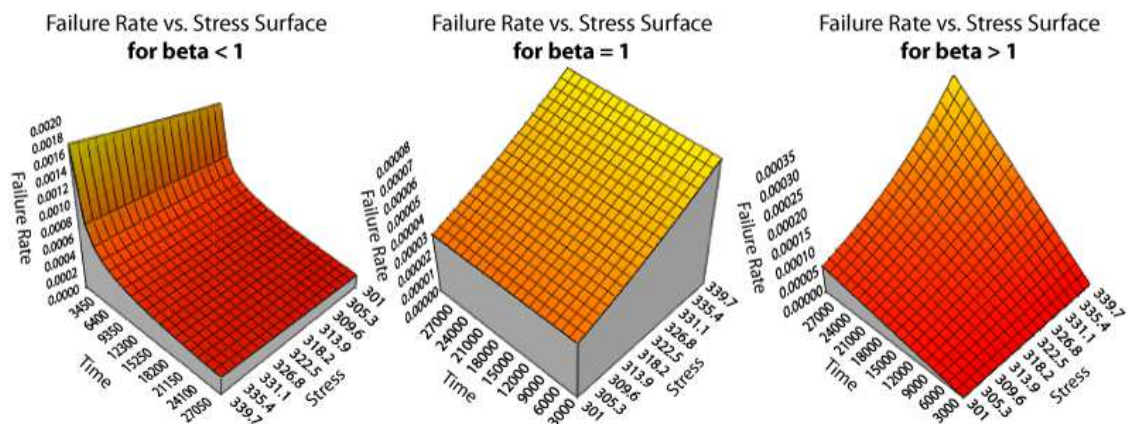
## Fiabilidad de vida

$$t_R = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \{-\ln[R(t_R, V)]\}^{\frac{1}{\beta}}$$

Este es el valor de vida para el cual una unidad funcionará con éxito con una fiabilidad de  $R(t_R)$ . Si  $R(t_R) = 0.50$ , entonces,  $t_R = \check{T}$ , la mediana, o la vida a la cual la mitad de las unidades o elementos pueden sobrevivir.

## Función tasa de fallo Arrhenius – Weibull

$$\lambda(T, V) = \frac{f(T, V)}{R(T, V)} = \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \left( \frac{T}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta-1}$$



Función de tasa de fallo con valores de beta diferentes

([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Al igual que en caso anterior, para la aproximación del valor de los parámetros, vamos a utilizar el método de máxima verosimilitud. En el caso de la distribución Arrhenius – Weibull tenemos

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln \left[ \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta-1} - \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} \right] - \sum_{i=1}^S N'_i \left( \frac{T'_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \ln[R''_{Li} - R''_{Ri}]$$

donde

$$R''_{Li} = e^{-\left( \frac{T''_{Li}}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta}}$$

$$R''_{Ri} = e^{-\left( \frac{T''_{Ri}}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta}}$$

$F_e$  es el número de grupos de puntos exactos de tiempos de fallo.

$N_i$  es el número de tiempos de fallo en el  $i^{th}$  grupo de tiempos de fallo.

$\beta$  es el parámetro de forma Weibull, desconocido y el primer parámetro a estimar.

$B$  es el parámetro Arrhenius, el segundo parámetro a estimar.

$C$  es el segundo parámetro Arrhenius, tercero y último parámetro a estimar.

$V_i$  es el nivel de esfuerzo del  $i^{th}$  grupo.

$T_i$  es el tiempo exacto de fallo del grupo.

$S$  es el número de grupos de puntos de fallo de suspensión.

$N'_i$  es el número de suspensiones en el  $i^{th}$  grupo de datos de suspensiones.

$T'_i$  es el tiempo del  $i^{th}$  grupo de suspensión.

$FI$  es el número de intervalos de grupos de datos.

$N''_i$  es el número de intervalos en el  $i^{th}$  grupo de datos de intervalos.

$T''_{Li}$  es el comienzo del  $i^{th}$  intervalo.

$T''_{Ri}$  es el final del  $i^{th}$  intervalo.

Como en el caso anterior también, las soluciones a la estimación de parámetros pasan por resolver  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{B}$  y  $\hat{C}$  haciendo las derivadas parciales de  $\Lambda$  con respecto a cada uno de ellos y haciéndolas iguales a cero:

Para el parámetro de forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Lambda}{\partial \beta} = & \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{F_e} N_i + \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right) - \\ & - \sum_{i=1}^{F_e} N_i \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} \ln \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right) - \\ & - \sum_{i=1}^S N'_i \left( \frac{T'_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} \ln \left( \frac{T'_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right) - \\ & - \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{\left( \frac{T''_{Li}}{C e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} \ln \left( \frac{T''_{Li}}{C e^{\frac{B}{V_i}}} \right) R''_{Li} - \left( \frac{T''_{Ri}}{C e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} \ln \left( \frac{T''_{Ri}}{C e^{\frac{B}{V_i}}} \right) R''_{Ri}}{R''_{Li} - R''_{Ri}} \end{aligned}$$

Para el parámetro segundo de Arrhenius:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial B} = -\beta \sum_{i=1}^{F_e} N_i \frac{1}{V_i} + \beta \sum_{i=1}^{F_e} N_i \frac{1}{V_i} \left( \frac{T_i}{\hat{C} e^{\frac{\hat{B}}{V_i}}} \right)^{\beta} +$$

$$\begin{aligned}
& + \beta \sum_{i=1}^S N'_i \frac{1}{V_i} \left( \frac{T'_i}{\hat{C} e^{\frac{\hat{B}}{V_i}}} \right)^{\beta} + \\
& + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{\beta}{V_i} \frac{(T''_{Li})^{\beta} R''_{Li} - (T''_{Ri})^{\beta} R''_{Ri}}{\left( C e^{\frac{B}{V_i}} \right)^{\beta} (R''_{Li} - R''_{Ri})}
\end{aligned}$$

Para el tercer parámetro de Arrhenius:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Lambda}{\partial C} &= -\frac{\beta}{C} \sum_{i=1}^{F_e} N_i + \frac{\beta}{C} \sum_{i=1}^{F_e} N_i \left( \frac{T_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} + \\
& + \frac{\beta}{C} \sum_{i=1}^S N'_i \left( \frac{T'_i}{C \cdot e^{\frac{B}{V_i}}} \right)^{\beta} + \\
& + \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{\beta}{C} \frac{(T''_{Li})^{\beta} R''_{Li} - (T''_{Ri})^{\beta} R''_{Ri}}{\left( C e^{\frac{B}{V_i}} \right)^{\beta} (R''_{Li} - R''_{Ri})}
\end{aligned}$$

### 2.2.3.6.5 Modelo de Arrhenius - Lognormal

La función densidad de probabilidad del modelo de Arrhenius – Lognormal viene dada por:

$$f(T) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

en la que

$$T' = \ln(T)$$

y

$T$  es el tiempo hasta el fallo

$T'$  es la media de los algoritmos naturales del tiempo hasta el fallo

$\sigma_{T'}$  es la desviación estándar de los logaritmos naturales del tiempo hasta el fallo

La mediana de una distribución lognormal es:

$$\check{T} = e^{\bar{T}'}$$

La función densidad de probabilidad del modelo Arrhenius – Lognormal se puede obtener primero haciendo  $\check{T} = L(V)$  con lo cual:

$$\check{T} = L(V) = C e^{\frac{B}{V}}$$

o bien

$$e^{\bar{T}'} = C e^{\frac{B}{V}}$$



en consecuencia

$$\bar{T}' = \ln(C) + \frac{B}{V}$$

Cruzando las ecuaciones de función de densidad tenemos:

$$f(T, V) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

Hay que considerar que en esta ecuación la función densidad de probabilidad Ahrrenius Lognormal, se ha asumido que la desviación estándar de los logaritmos naturales de los tiempos de fallo es independiente del esfuerzo. Este supuesto implica que la forma de la distribución no cambia con el esfuerzo, sabiendo que esta desviación es el parámetro de forma de la distribución lognormal.

Ahora vamos a ver como en las distribuciones anteriores, las propiedades estadísticas del modelo.

### Media

La media de vida del modelo de Ahrrenius – Lognormal (media del tiempo hasta el fallo) viene dada por

$$\bar{T} = e^{\bar{T}' + \frac{1}{2}\sigma_{T'}^2} = e^{\ln(C) + \frac{B}{V} + \frac{1}{2}\sigma_{T'}^2}$$

La media de los logaritmos naturales del tiempo hasta el fallo, en términos de la media y la desviación estándar es

$$\bar{T}' = \ln(\bar{T}) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma_T^2}{\bar{T}^2} + 1\right)$$

### Desviación estándar

La desviación estándar de vida del modelo de Arrhenius – Lognormal (desviación estándar del tiempo hasta el fallo) viene dada por

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2\bar{T}'} + \sigma_{T'}^2\right) \left(e^{\sigma_{T'}^2} - 1\right)} = \sqrt{\left(e^{2\left(\ln(C) + \frac{B}{V}\right) + \sigma_{T'}^2}\right) \left(e^{\sigma_{T'}^2} - 1\right)}$$

La desviación estándar de los logaritmos naturales del tiempo hasta el fallo, en términos de la media y la desviación estándar es

$$\sigma_{T'} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_T^2}{\bar{T}^2} + 1\right)}$$

### Moda

$$\tilde{T} = e^{\bar{T}' - \sigma_{T'}^2} = e^{\ln(C) + \frac{B}{V} - \sigma_{T'}^2}$$

### Función de fiabilidad

La fiabilidad de un periodo de vida T , comenzando en el año cero, viene dado por

$$R(T, V) = \int_T^\infty f(t, V) dt$$

o también

$$R(T, V) = \int_{T'}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2} dt$$

No hay solución cerrada para la función de fiabilidad lognormal. Las soluciones pueden obtenerse a través de tablas estándar.

#### Fiabilidad de vida

$$T'_R = \ln(C) + \frac{B}{V} + z \cdot \sigma_{T'}$$

donde

$$z = \Phi^{-1} [F(T'_R, V)]$$

y

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z(T', V)} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Si  $T' = \ln(T)$  entonces la fiabilidad de vida es

$$t_R = e^{T'_R}$$

**Función tasa de fallo de Ahrrenius - Lognormal**

$$\lambda(T, V) = \frac{f(T, V)}{R(T, V)} = \frac{\frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2}}{\int_{T'}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2} dt}$$

Como siempre, la estimación de parámetros por el método de máxima verosimilitud nos da la ecuación:

$$\ln(L) = \Lambda = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln \left[ \frac{1}{\sigma_{T'} T_i} \phi \left( \frac{\ln(T_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}} \right) \right] +$$

$$\ln(L) = \Lambda = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \ln \left[ \frac{1}{\sigma_{T'} T_i} \phi \left( \frac{\ln(T_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}} \right) \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{FI} N_i'' \ln[\Phi(z_{Ri}'') - \Phi(z_{Li}'')]$$

donde

$$z''_{Li} = \frac{\ln T''_{Li} - \ln C - \frac{B}{V_i}}{\sigma'_{T'}}$$

$$z''_{Ri} = \frac{\ln T''_{Ri} - \ln C - \frac{B}{V_i}}{\sigma'_{T'}}$$

$F_e$  es el número de grupos de puntos exactos de tiempos de fallo.

$N_i$  es el número de tiempos de fallo en el  $i^{th}$  rupo de tiempos de fallo.

$\sigma_{T'}$  es la desviación estándar del logaritmo natural del tiempo a fallo, primero a estimar

$B$  es el parámetro Arrhenius, el segundo parámetro a estimar.

$C$  es el segundo parámetro Arrhenius, tercero y último parámetro a estimar.

$V_i$  es el nivel de esfuerzo del  $i^{th}$  grupo.

$T_i$  es el tiempo exacto de fallo del grupo.

$S$  es el número de grupos de puntos de fallo de suspensión.

$N'_i$  es el número de suspensiones en el  $i^{th}$  grupo de datos de suspensiones.

$T'_i$  es el tiempo del  $i^{th}$  grupo de suspensión.

$FI$  es el número de intervalos de grupos de datos.

$N''_i$  es el número de intervalos en el  $i^{th}$  rupo de datos de intervalos.

$T''_{Li}$  es el comienzo del  $i^{th}$  intervalo.

$T''_{Ri}$  es el final del  $i^{th}$  ntervalo.

La solución pasa por conocer el valor de los valores a estimar, en este caso,  $\hat{\sigma}_{T'}$ ,  $\hat{B}$  y  $\hat{C}$ , derivando  $\Lambda$  con respecto a cada uno de ellos y haciendo la derivada parcial igual a cero, como en los casos de las distribuciones anteriores.

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial B} = \frac{1}{\sigma_{T'}^2} \sum_{i=1}^{F_e} N_i \frac{1}{V_i} (\ln(T_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}) + \frac{1}{\sigma_{T'}} \sum_{i=1}^S N'_i \frac{1}{V_i} \frac{\phi\left(\frac{\ln(T'_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}}$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial C} = \frac{1}{C \cdot \sigma_{T'}^2} \sum_{i=1}^{F_e} N_i (\ln(T_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}) + \frac{1}{C \cdot \sigma_{T'}} \sum_{i=1}^S N'_i \frac{\phi\left(\frac{\ln(T'_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}}$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \sigma_{T'}} = \sum_{i=1}^{F_e} N_i \left( \frac{\left( \ln(T_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i} \right)^2}{\sigma_{T'}^3} - \frac{1}{\sigma_{T'}} \right) + \frac{1}{\sigma_{T'}} \sum_{i=1}^S N'_i \frac{\left( \frac{\ln(T'_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}} \right) \phi\left(\frac{\ln(T'_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln(T'_i) - \ln(C) - \frac{B}{V_i}}{\sigma_{T'}}\right)} - \sum_{i=1}^{FI} N''_i \frac{z''_{Ri} \varphi(z''_{Ri}) - z''_{Li} \varphi(z''_{Li})}{\sigma_{T'}^2 (\Phi(z''_{Ri}) - \Phi(z''_{Li}))}$$

en las cuales

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(x)^2}$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

#### 2.2.3.7 Relación de Eyring

La relación de Eyring surge a través de la mecánica cuántica y es utilizada, sobre todo, cuando el factor de aceleración del ensayo es la temperatura. No obstante, también se emplean otros tipos de factores a parte de la temperatura, como la humedad, cuya relación es

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-\left(A - \frac{B}{V}\right)}$$

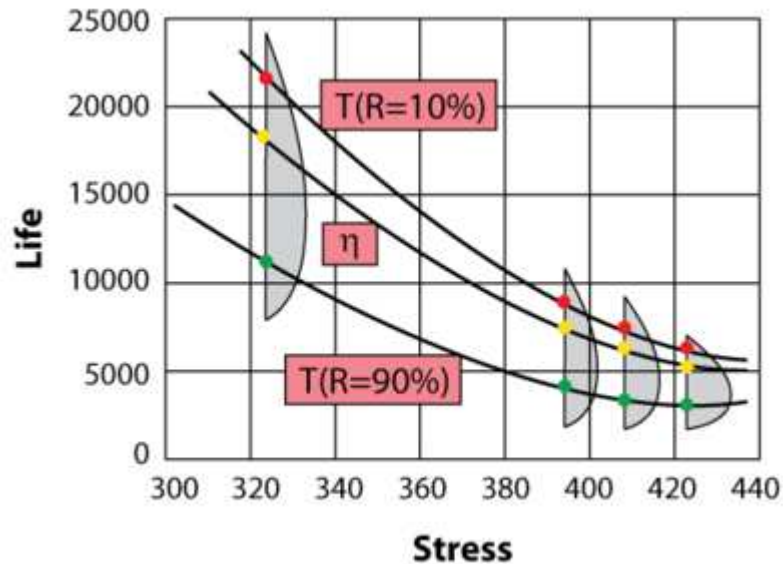
en la que

L es una medida cuantificada de la vida, como la media, vida característica..

V es el nivel de esfuerzo, si es la temperatura, en valor absoluto.

A es uno de los parámetros del modelo a determinar.

B es otro de los parámetros del modelo a determinar.



Gráfica de relación de Eyring en diferentes casos, suponiendo distribución Weibull  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

En realidad, la relación de Eyring es muy parecida a la relación de Arrhenius, se puede ver si escribimos las ecuaciones de la forma siguiente

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-\left(A - \frac{B}{V}\right)} = \frac{e^{-A}}{V} e^{\frac{B}{V}}$$

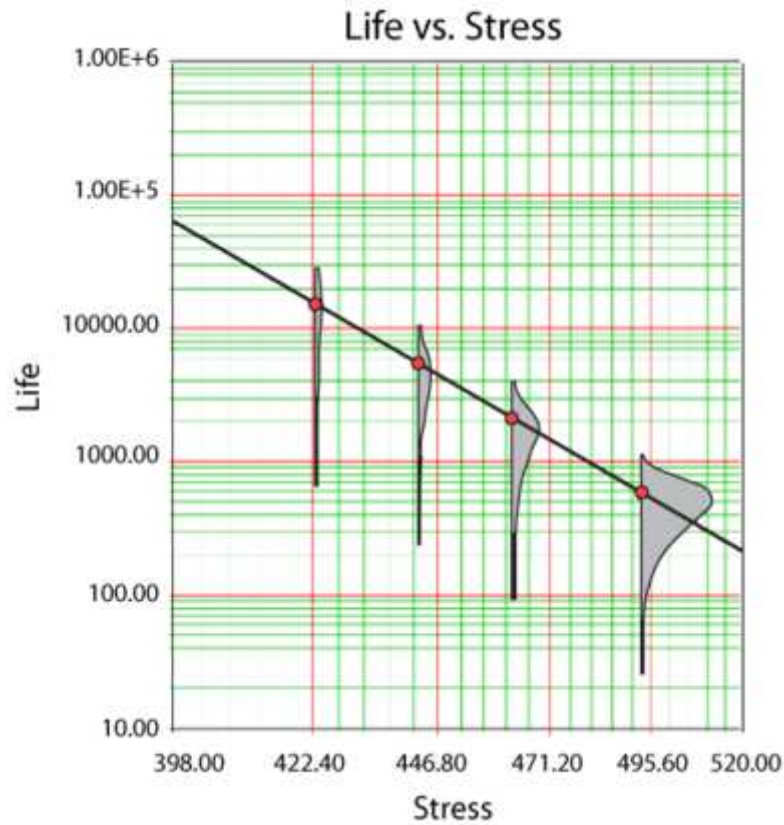
o también

$$L(V) = \frac{1}{V} \text{Const.} \cdot e^{\frac{B}{V}}$$

La relación de Arrhenius viene dada por

$$L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}}$$

Si ahora las comparamos, vemos que la única diferencia es el término  $\frac{1}{V}$ . Por norma general, las dos relaciones arrojan resultados muy similares.



Gráfica de la relación de Eyring en escala logarítmica  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

#### 2.2.3.7.1 Factor de aceleración

Para esta relación tenemos un factor de aceleración igual a

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{V_u} e^{-\left(A - \frac{B}{V_u}\right)}}{\frac{1}{V_A} e^{-\left(A - \frac{B}{V_A}\right)}} = \frac{e^{\frac{B}{V_u}}}{e^{\frac{B}{V_A}}} = \frac{V_A}{V_u} e^{B\left(\frac{1}{V_u} - \frac{1}{V_A}\right)}$$



### 2.2.3.8 Ley de Potencia Inversa

La Ley Inversa de Potencia (*Inverse Power Law, IPL*) se utiliza de forma común para los casos de factores de aceleración no térmicos, y viene dada por

$$L(V) = \frac{1}{KV^n}$$

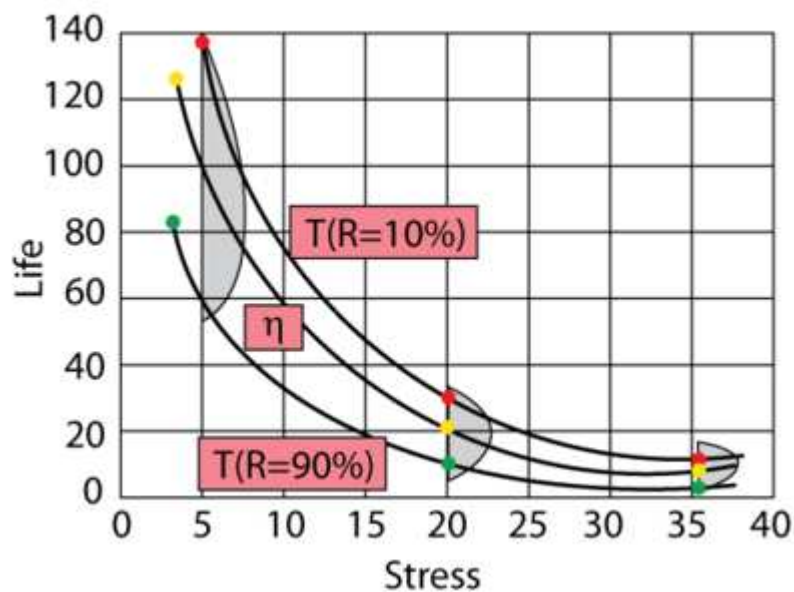
donde

L es una medida cuantificada de la vida, como la media, vida característica..

V es el nivel de esfuerzo.

K es uno de los parámetros del modelo a determinar, y es mayor que cero.

n es otro de los parámetros del modelo a determinar.

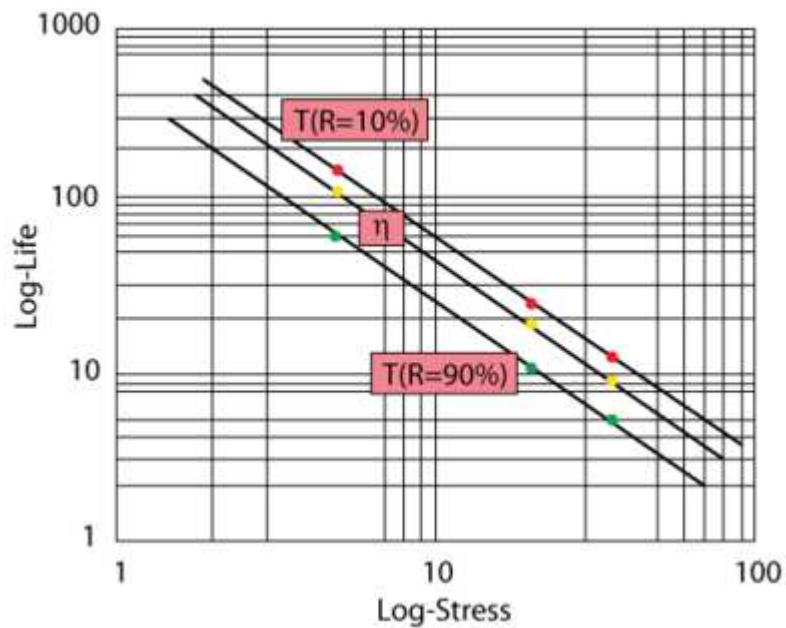


Gráfica de relación inversa de potencia en diferentes casos, suponiendo distribución Weibull  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

La ley de potencia inversa (IPL) se ve como una línea recta cuando se traza en una escala logarítmica. La ecuación de la recta es igual a:

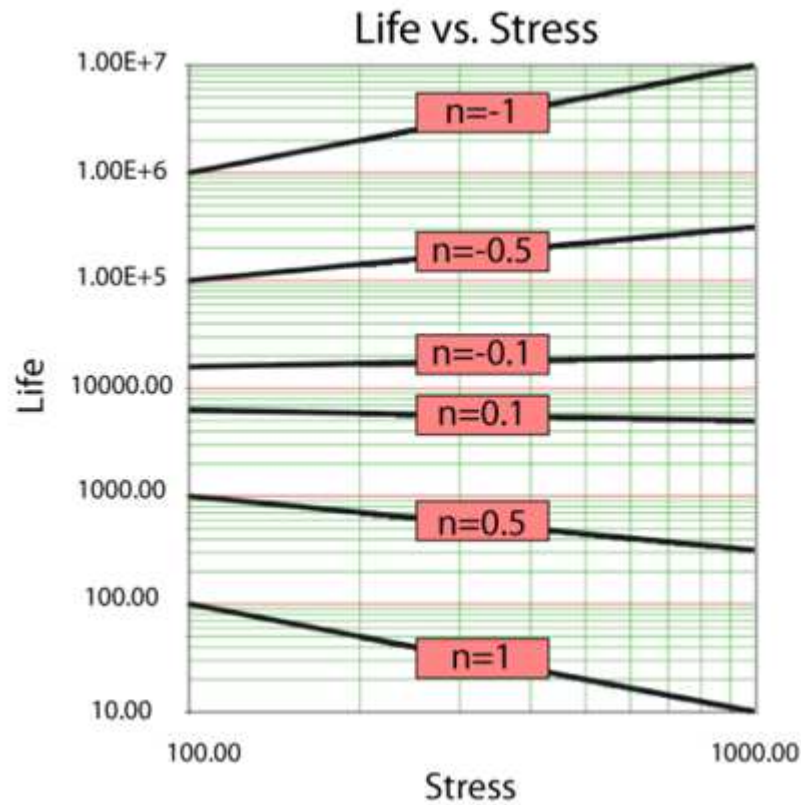
$$\ln(L) = -\ln(K) - n \ln(V)$$

La representación gráfica es muy utilizada en la estimación de los parámetros de la relación de la ecuación de potencia inversa ya que su obtención es tan simple como encontrar la intercepción y la pendiente en la ecuación anterior.



Gráfica de relación inversa de potencia en escala logarítmica  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

El parámetro  $n$  en la relación inversa de potencia es una medida del efecto del esfuerzo sobre la vida. A medida que el valor absoluto de  $n$  se incrementa, es mayor el efecto del esfuerzo. Los valores negativos del parámetro  $n$  muestran un incremento en la vida con el esfuerzo. Los valores cercanos a cero indican un efecto muy bajo del esfuerzo en la vida, por ejemplo, un  $n=0$ , sería vida constante con el esfuerzo.



Gráfica de esfuerzo vida para diferentes valores de n  
(www.weibull.com)

#### 2.2.3.8.1 Factor de aceleración

El factor de aceleración viene dado por la ecuación

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{KV_u^n}}{\frac{1}{KV_A^n}} = \left( \frac{V_A}{V_u} \right)^n$$

En la que

$L_{USE}$  es el valor de vida al nivel de esfuerzo de uso.

$L_{Accelerated}$  es el valor de la vida al nivel de esfuerzo acelerado.

$V_u$  es el nivel de esfuerzo de uso.

$V_A$  es el nivel de esfuerzo acelerado.

#### 2.2.3.8.2 Método de Potencia Inversa - Lognormal

Los supuestos para el modelo de potencia inversa - lognormal son:

1. Para cualquier nivel de esfuerzo  $V$  la vida del producto tiene una distribución lognormal.
2. La desviación estándar,  $\sigma$ , del logaritmo de la vida es una constante que no depende de  $V$
3. La vida media,  $t_{50}$ , es

$$\tau_{0,50}(V) = \frac{10^{\gamma_0}}{V^{\gamma_1}}$$

Los parámetros  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  y  $\sigma$  son característicos del producto y el método de análisis. Igualmente la media  $\mu(t)$  es una función del logaritmo natural de la vida y es lineal con la transformación  $x = -\log V$ .

$$\mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x$$

#### 2.2.3.8.3 Método de Potencia Inversa - Weibull

Los supuestos para el modelo de potencia-Weibull son:

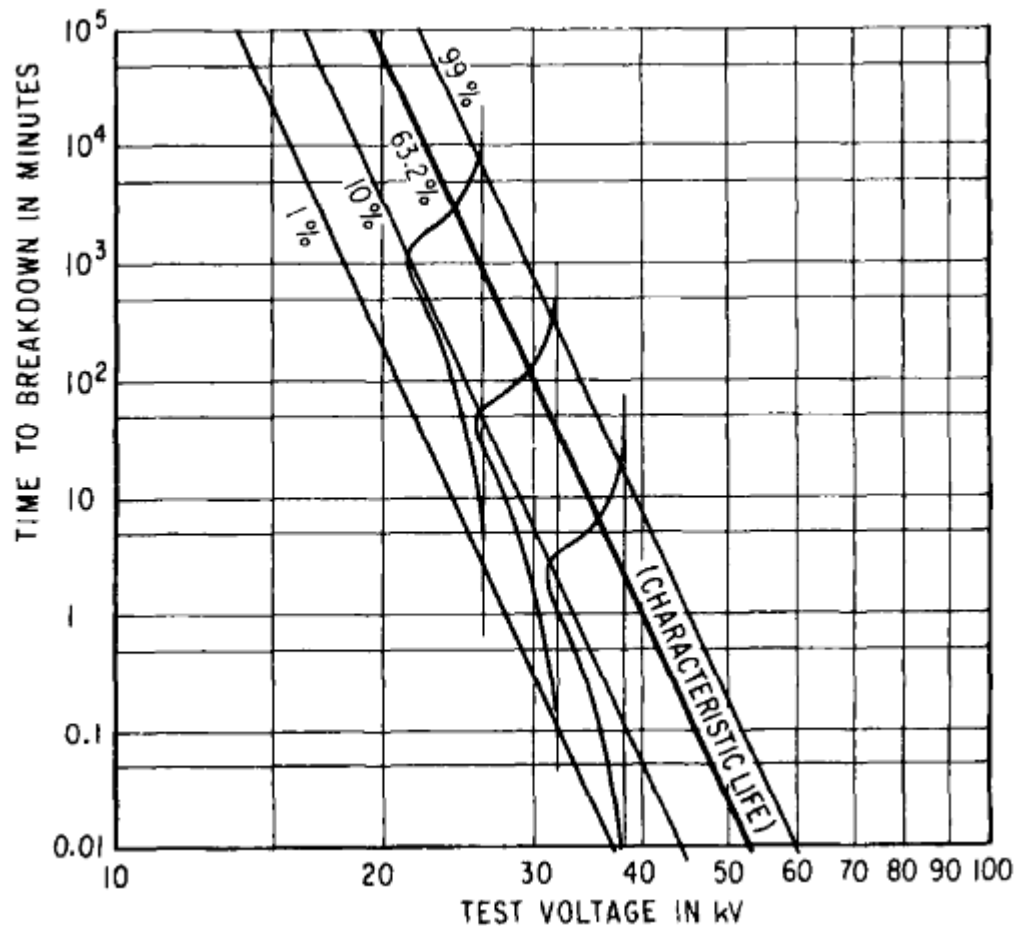
1. Para cualquier nivel de esfuerzo  $V$  la vida del producto tiene una distribución de Weibull.

2. El parámetro de forma de Weibull  $\beta$  es una constante independiente de V.

3. La característica de vida de Weibull  $\eta$  es

$$\eta(V) = \frac{e^{\gamma_0}}{V^{\gamma_1}}$$

Los parámetros  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  y  $\beta$  son característicos del producto y el método de análisis. Por ejemplo,  $\eta(V)$  en función de V es una línea recta en un papel logarítmico



Gráfica ejemplo de relación inversa de potencia en papel logarítmico

([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

1. El logaritmo natural de la vida sigue una función de valor extremo.

2. El parámetro de escala de la función de valor extremo,  $1/\beta$ , es una constante.

3. El parámetro  $\xi = \ln(\eta)$  de la función de valor extremo es una función lineal de  $x = -\ln V$

#### 2.2.3.8.4 Método de Potencia Inversa - Exponencial

Los supuestos para el modelo de potencia - exponencial son:

1. Para cualquier nivel de stress  $V$  la vida del producto tiene una distribución exponencial.

2. La vida media  $\vartheta$  es

$$\theta(V) = \frac{e^{\gamma_0}}{V^{\gamma_1}}$$

Los parámetros  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  y  $\beta$  son característicos del producto y el método de análisis. También,  $\vartheta(V)$  en función de  $V$  es una línea recta en un papel logarítmico, que equivale a que la tasa de fallo  $\lambda=1/\vartheta$  es una función de la potencia de  $V$

$$\lambda(V) = \frac{V^{\gamma_1}}{e^{\gamma_0}}$$

#### 2.2.3.8.5 Método de Potencia Inversa y Coffin Mason

En el análisis de ensayos de vida acelerados, los ciclos térmicos se tratan comúnmente como un problema de fatiga de ciclo bajo, utilizando la relación de potencia inversa.

Coffin y Manson expusieron que el número de ciclos hasta el fallo de un metal sometido a ciclos térmicos viene dado por

$$N = \frac{C}{(\Delta T)^\gamma}$$

donde

$N$  es el número de ciclos hasta el fallo

$C$  es una constante propia del metal.

$\gamma$  es otra constante propia del metal.

$\Delta T$  es el margen de tiempo del ciclo térmico.

Esta relación es básicamente la relación de potencia inversa, en la que el esfuerzo,  $V$ , es sustituido por  $\Delta V$ . Básicamente se trata de un intento de simplificar el análisis de un ensayo de esfuerzo variable en el tiempo mediante el uso del modelo de esfuerzo constante. Es un método muy utilizado para ciclos térmicos y mecánicos de ensayos de fatiga. Sin embargo, utilizando esta simplificación, hay que considerar los siguientes supuestos y las aproximaciones. En primer lugar, los efectos de aceleración debidos a la tasa de esfuerzo cambiante se pasarán por alto. Es decir, se supondrá que los casos de fallo son acelerados por la diferencia de esfuerzo y no por la rapidez con que se produce esa diferencia. En segundo lugar, los efectos de la aceleración debida a la relajación se pasan por alto también.

### 2.2.3.9 Relación de temperatura - humedad

La relación temperatura-humedad (T-H), una variación de la relación Eyring, se utiliza para la predicción de vida en condiciones de uso cuando temperatura y humedad son aceleradores de esfuerzo en el ensayo. Este modelo de combinación viene dado por:

$$L(V, U) = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$$

$\phi$  es uno de los tres parámetros a determinar.

$b$  es el segundo parámetro a determinar.

$A$  es una constante, también por determinar.

$U$  es la humedad relativa en porcentaje.

$V$  es la temperatura en unidades absolutas.

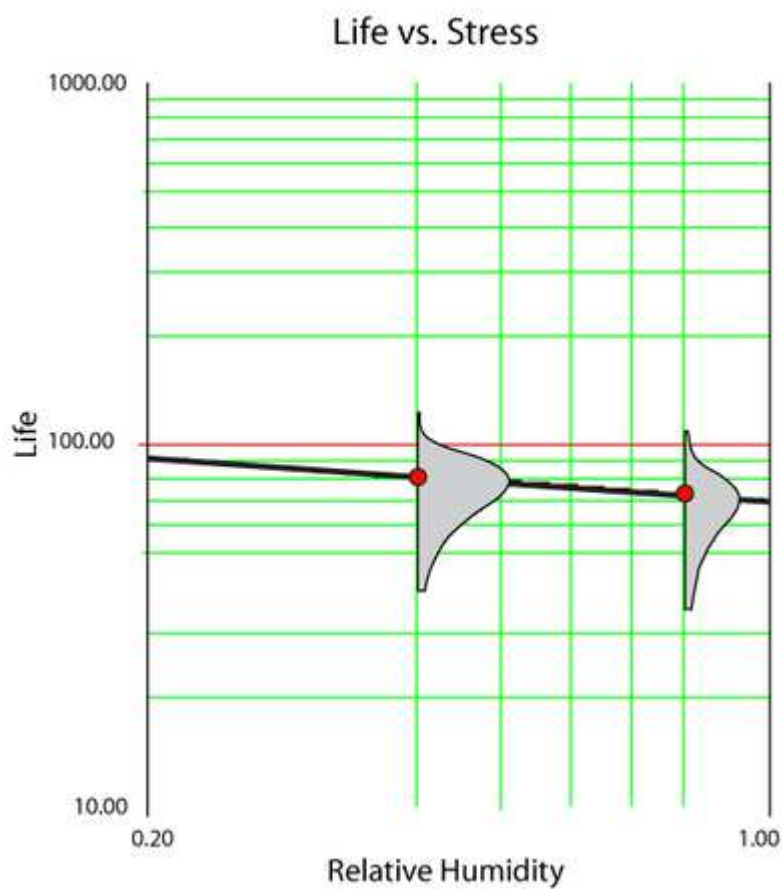
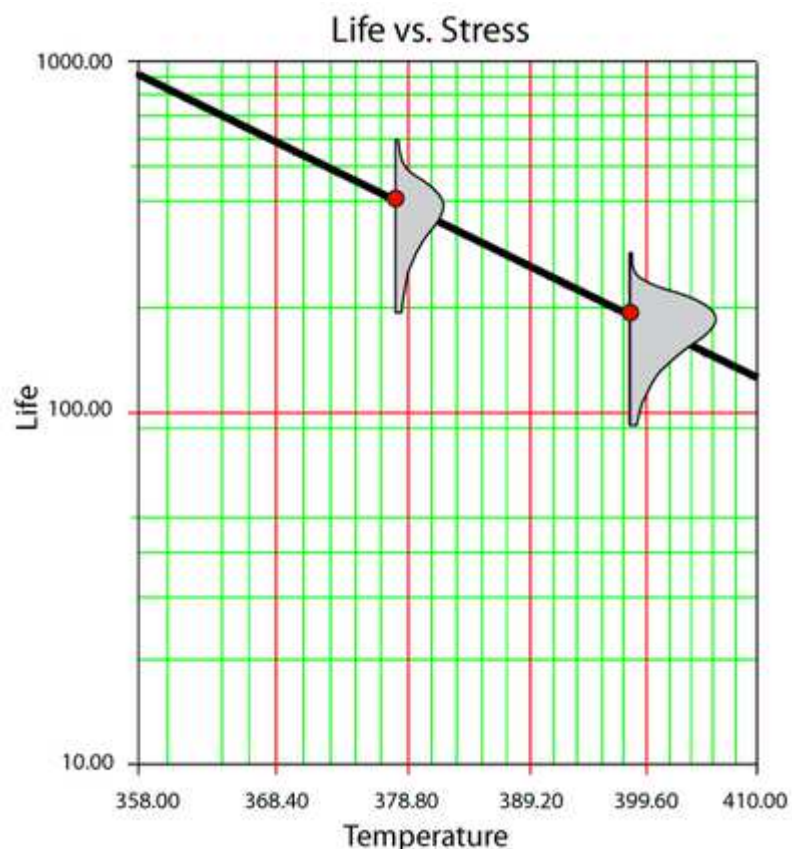
La relación T-H puede ser lineal y se representa en una gráfica de esfuerzo vida. La relación se muestra en formato lineal tomando el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación.

$$\ln(L(V, U)) = \ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}$$

Dado que la vida está ahora en función de dos esfuerzos, se puede obtener una gráfica de esfuerzo vida si mantenemos uno de los dos esfuerzos constante y variamos el otro. Esto dará lugar a una línea recta, como describe la ecuación anterior, donde el término para el esfuerzo que se mantiene en un valor fijo se convierte en otra de las constantes.

Ahora mostramos dos gráficas, la primera para una humedad relativa fija, y la segunda para una temperatura fija.





Gráficas para una humedad relativa fija para una temperatura fija  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

## 2.2.3.9.1 Factor de aceleración

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{Ae^{\frac{\phi}{V_u} + \frac{b}{U_u}}}{Ae^{\frac{\phi}{V_A} + \frac{b}{U_A}}} = e^{\phi\left(\frac{1}{V_u} - \frac{1}{V_A}\right) + b\left(\frac{1}{U_u} - \frac{1}{U_A}\right)}$$

$L_{USE}$  es el nivel de vida al nivel de esfuerzo de uso.

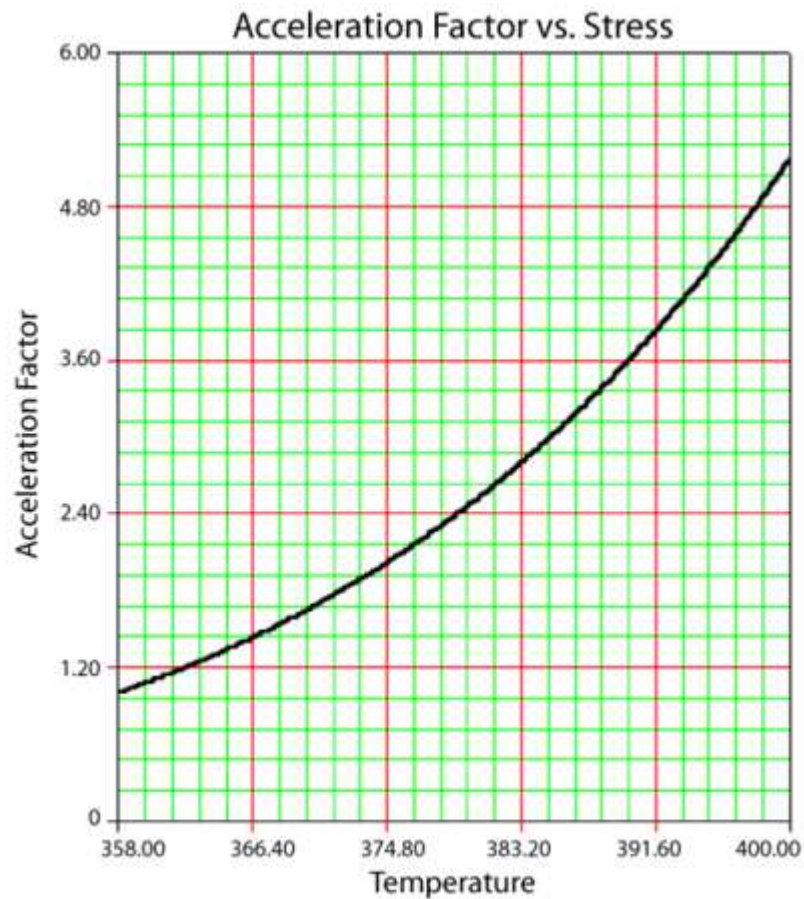
$L_{Accelerated}$  es el nivel de vida al nivel de esfuerzo acelerado.

$V_u$  es la temperatura al nivel de uso.

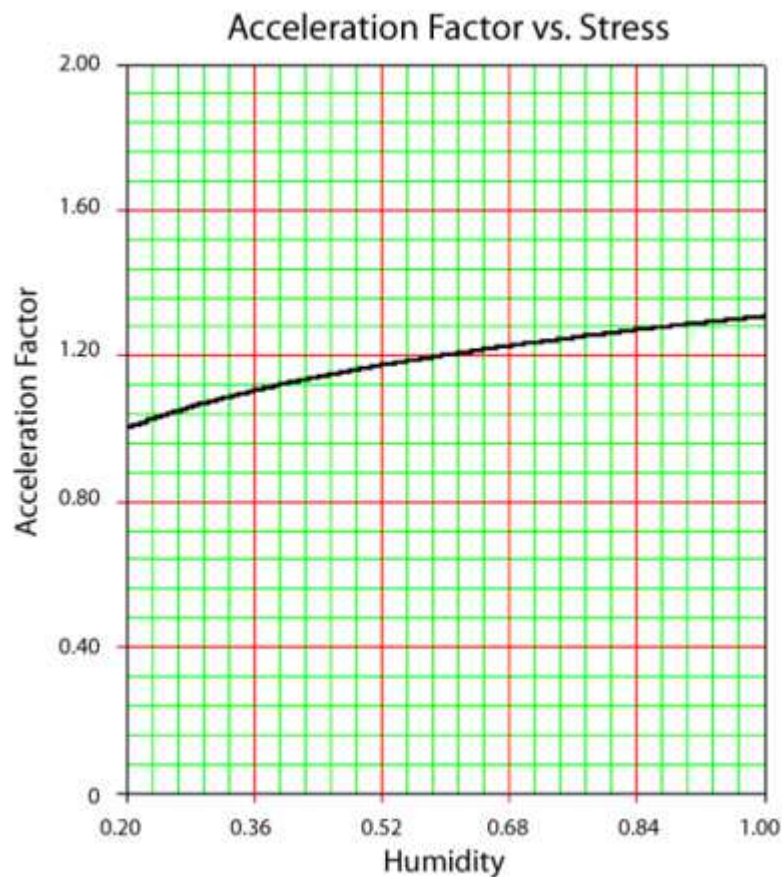
$V_A$  es la temperatura al nivel de esfuerzo acelerado.

$U_A$  es el nivel de humedad al nivel de esfuerzo acelerado.

$U_u$  es el nivel de humedad al nivel de uso.



Gráfica del factor de aceleración respecto a la temperatura con la humedad fija  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))



Gráfica del factor de aceleración respecto a la humedad con la temperatura fija  
([www.weibull.com](http://www.weibull.com))

Como en el caso anterior, en la primera gráfica tenemos la humedad relativa fijada y en la segunda la temperatura.

#### 2.2.3.9.2 Relación TH - Exponencial

Como en el resto de las distribuciones de las que hemos estado hablando, vamos a analizar la TH y sus propiedades por separado.

La función de densidad de probabilidad TH es:

$$f(t, V, U) = \frac{1}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)} \cdot e^{-\frac{t}{A} \cdot e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}}$$

Sus propiedades estadísticas las describimos a continuación:

#### Media o MTTF

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t, V, U) dt$$

Que en la ecuación resulta:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{1}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)} e^{-\frac{t}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}} dt = A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$$

#### Mediana

Viene dada por la expresión

$$\tilde{T} = 0.693 \cdot A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$$

#### Moda

$$\tilde{T} = 0$$

#### Desviación estándar

$$\sigma_T = A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$$

#### Función de fiabilidad

$$R(T, V, U) = e^{-\frac{T}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}}$$

Es el complemento de la función acumulativa exponencial

$$R(T, V, U) = 1 - Q(T, V, U) = 1 - \int_0^T f(T) dT$$

$$R(T, V, U) = 1 - \int_0^T \frac{1}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)} e^{-\frac{T}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}} dT = e^{-\frac{T}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}}$$

#### Fiabilidad condicional

$$R(T, t, V, U) = \frac{R(T + t, V, U)}{R(T, V, U)} = \frac{e^{-\lambda(T+t)}}{e^{-\lambda T}} = e^{-\frac{t}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}}$$

#### Fiabilidad de vida

Viene dada a través del parámetro de objetivo de tiempo de vida:

$$R(t_R, V, U) = e^{-\frac{t_R}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}}$$

$$\ln[R(t_R, V, U)] = -\frac{t_R}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}$$

donde es

$$t_R = -A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \ln[R(t_R, V, U)]$$

#### 2.2.3.9.3 Relación TH - Weibull

Tenemos como expresión que la define

$$f(t, V, U) = \frac{\beta}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)} \left( \frac{t}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{A} e^{-\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}\right)^{\beta}}$$

Ahora vemos sus propiedades estadísticas:

#### Media o MTTF

$$\bar{T} = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

Donde  $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$  se aproxima a  $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

#### Mediana

$$\check{T} = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}$$

#### Moda

$$\tilde{T} = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

#### Desviación estándar

$$\sigma_T = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)\right)^2}$$

#### Función de fiabilidad TH de Weibull

$$R(T, V, U) = e^{-\left(\frac{T}{A} e^{\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right)}\right)^{\beta}}$$

**Función de fiabilidad condicional**

$$R(T, t, V, U) = e^{-\left[ \left( \frac{T+t}{A} e^{-\left( \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} \right)} \right)^{\beta} - \left( \frac{T}{A} e^{-\left( \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} \right)} \right)^{\beta} \right]}$$

**Fiabilidad de vida**

$$t_R = A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \{ -\ln [R(T_R, V, U)] \}^{\frac{1}{\beta}}$$

**Función margen o tasa de fallo TH Weibull**

$$\lambda(T, V, U) = \frac{f(T, V, U)}{R(T, V, U)} = \frac{\beta}{A} e^{-\left( \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} \right)} \left( \frac{T}{A} e^{-\left( \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} \right)} \right)^{\beta-1}$$

*2.2.3.9.4 Relación TH - Lognormal*

La función de densidad de probabilidad es

$$f(T) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \overline{T'}}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

donde

$T'$  es  $\ln(T)$ .

$T$  es el tiempo hasta el fallo.

$\overline{T'}$  es la media del  $\ln$  del tiempo al fallo.

$\sigma_{T'}$  es la desviación estándar del  $\ln$  del tiempo hasta el fallo.

$$\check{T} = e^{\overline{T'}}$$

La media de la distribución lognormal es  $\check{T} = L(V, U)$  al modelo se puede obtener haciendo

$$\check{T} = L(V, U) = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$$

Obteniendo

$$\bar{T}' = \ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}$$

Sustituyendo en la ecuación tenemos finalmente

$$f(T, V, U) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(A) - \frac{\phi}{V} - \frac{b}{U}}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

De nuevo, vamos a repasar las propiedades estadísticas de la distribución

### Media o MTTF

En términos de tiempo hasta el fallo:

$$\bar{T} = e^{\bar{T}' + \frac{1}{2} \sigma_{T'}^2} = e^{\ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} + \frac{1}{2} \sigma_{T'}^2}$$

La media del logaritmo en términos de tiempo hasta el fallo y desviación:

$$\bar{T}' = \ln(\bar{T}) - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sigma_{T'}^2}{\bar{T}^2} + 1 \right)$$



**Desviación estándar**

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2\bar{T}'} + \sigma_{T'}^2\right) \left(e^{\sigma_{T'}^2} - 1\right)} = \sqrt{\left(e^{2\left(\ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right) + \sigma_{T'}^2}\right) \left(e^{\sigma_{T'}^2} - 1\right)}$$

O también

$$\sigma_{T'} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_T^2}{\bar{T}^2} + 1\right)}$$

**Moda**

$$\tilde{T} = e^{\bar{T}' - \sigma_{T'}^2} = e^{\ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} - \sigma_{T'}^2}$$

**Función de fiabilidad TH Lognormal**

$$R(T, V, U) = \int_{T'}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \ln(A) - \frac{\phi}{V} - \frac{b}{U}}{\sigma_{T'}} \right)^2} dt$$

**Fiabilidad de vida**

$$T'_R = \ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} + z \cdot \sigma_{T'}$$

**Función margen o tasa de fallo**

$$\lambda(T, V, U) = \frac{f(T, V, U)}{R(T, V, U)} = \frac{\frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(A) - \frac{\phi}{V} - \frac{b}{U}}{\sigma_{T'}} \right)^2}}{\int_{T'}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \ln(A) - \frac{\phi}{V} - \frac{b}{U}}{\sigma_{T'}} \right)^2} dt}$$

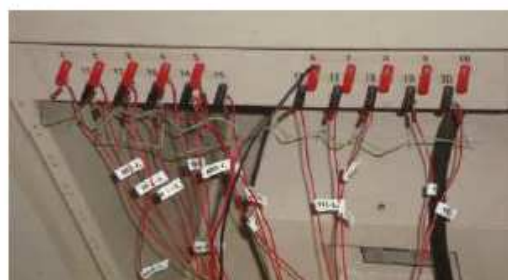
## 3. MÉTODO DE TRABAJO EN LABORATORIO

En este capítulo vamos a describir los modelos de instrumentación de que hemos dispuesto para la realización de los ensayos sobre los componentes. Será un breve resumen de cada uno de ellos con algún esquema y fotografía para hacer más gráfica la explicación para aquellos lectores no acostumbrados a este tipo de material.

### 3.1 EQUIPAMIENTO LABORATORIO HW

#### 3.1.1 CÁMARA CLIMÁTICA

La cámara climática *Pressure Cooker* modelo PC-422RIII permite programar márgenes de temperatura de 105°C hasta 158,1°C y de humedad que van del 50% al 100%, con presiones máximas de 3 atmósferas. Consta de un temporizador para programar los tiempos de ensayos. Dispone de 20 canales de medida que están conectados internamente y que facilitan la conexión con los instrumentos de medida a través de unos tornillos cubiertos de material manejable.



### 3.1.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN AGILENT E3631A

Las fuentes de alimentación de Agilent ofrecen características básicas para el desarrollo del ensayo, salida triple de 80 W, GPIB, un bajo ruido de rizo; mediciones interrelacionadas y características para una programación básica. Esta fuente de salida limpia y fiable está diseñada para aplicaciones de propósito general. Combina capacidades de banco con capacidades de un sistema flexible de múltiple salida.



**Fuente de alimentación Agilent E3631A**  
(<http://www.home.agilent.com>)

Características:

Rangos de Salida

- Output 1: 0 to 6 V, 0 to 5 A
- Output 2: 0 to +25 V, 0 to 1 A
- Output 3: 0 to -25 V, 0 to 1 A

Exactitud de Programación

- Voltaje: 0.05% + 20 mV, 0.05% + 20 mV, 0.1% + 5 mV
- Corriente: 0.15% + 4 mA, 0.15% + 4 mA, 0.2% + 10 mA

Ruido y Rizo (20 Hz a 20 MHz)

- Modo Normal de Voltaje: <350  $\mu$ Vrms/ 2 mV p-p, <350  $\mu$ V rms/2 mV p-p, <350  $\mu$ V rms/2 mV p-p

- Modo Normal de Corriente:  $<500\ \mu\text{A rms}$ ,  $<500\ \mu\text{A rms}$ ,  $<2\ \text{mA rms}$
- Modo de corriente en modo común:  $<1.5\ \mu\text{A rms}$ ,  $<1.5\ \mu\text{A rms}$ ,  $<1.5\ \mu\text{A rms}$

Exactitud de lectura en Medidores

- Voltaje:  $0.05\% + 10\ \text{mV}$ ,  $0.05\% + 10\ \text{mV}$ ,  $0.1\% + 5\ \text{mV}$
- Corriente:  $0.15\% + 4\ \text{mA}$ ,  $0.15\% + 4\ \text{mA}$ ,  $0.2\% + 10\ \text{mA}$

### 3.1.3 MEDIDOR LUMÍNICO MS9020B

El MS9020B es un instrumento de medición óptica que incorpora un LED y fuentes de luz LD y de medidor de potencia óptica. Este medidor cubre bandas de 0,66 micras, 0.85 micras y 1.3 micras y 1,55 micras para la medición de la pérdida óptica, con lo cual, es posible medir la pérdida óptica sobre un amplio rango dinámico sin efecto de la luz parásita.



### 3.1.4 MULTÍMETRO KEITHLEY 2700

El multímetro Keithley 2700 es un sistema de adquisición de datos, funciona como un multímetro pero también trabaja como un sistema de adquisición de datos con cualquier PC por vía RS232 ó GPIB, esta última es la que hemos utilizado nosotros.

Incorpora dos slots para alojar tarjetas, lo cual hace posible la medida y el control multipunto y un multímetro de 6 ½ dígitos reales (22 bits). El conmutador permite seleccionar entre medidas por los terminales delanteros o posteriores en multicanal.



**Multímetro Keithley 2700**  
([www.finaltest.com.mx](http://www.finaltest.com.mx))

El modelo 2700 puede realizar medidas de temperatura, medidas de precisión y control y adquisición de datos de señales mixtas. Tiene 13 funciones de medida, incluyendo acondicionamiento de señal y conversión de unidades.

Características del modelo 2700:

- Hasta 80 canales diferenciales analógicos configurables individualmente.
- Entradas y Salidas digitales aisladas.
- Precisión de 6 ½ dígitos reales (22 bits) con 13 funciones de medida incluyendo acondicionamiento de señal.
- Entradas por *jack* en panel frontal. Operación como multímetro para uso rápido
- facilitando enormemente la calibración del equipo.

- Ruido inferior a 1,5 mV. Entradas hasta 1.000V; 3 A en modo multímetro.
- Velocidad de medida hasta 2000 muestras / segundo, hasta 300V, 3A en modo multicanal.
- Software de adquisición sin necesidad de programación.
- Características heredadas del modelo 2700:
  - Vcc (100V), Vca (750V), Icc, Ica (3A).
  - Resistencia a 2 y 4 hilos con compensación de offset.
  - Temperatura: Termopares, RTD, Termistores.
  - Compensación de unión fría automática para termopares.
  - Relación, frecuencia, periodo, continuidad.
  - 2 entradas TTL.
  - 5 salidas TTL para límites / alarmas.
  - Configuración independiente por canal.
  - Memoria de 55.000 datos con capacidad de lectura y transmisión.
  - Reloj de tiempo real incorporado.
  - Lecturas con información de hora y fecha.
  - 4 memorias de configuración de medida no volátiles.
  - Funciones (mx+b, %) independientes por canal.
  - Interfaces de comunicación GPIB (IEEE-488.2) y RS232.
  - Software Xlink .
  - Drivers Para Test Point y Labview.
  - 3 Años de garantía.

#### 3.1.5 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS KEITHLEY 2700

La tarjeta de adquisición de datos Keithley 2700 dispone de un multiplexor de 40 canales de 2 hilos ó 20 canales de conmutación de multiplexor de 4 hilos que se puede configurar como dos bancos independientes de multiplexores. El Modelo 7702 proporciona dos canales protegidos adicionales para mediciones de corriente.



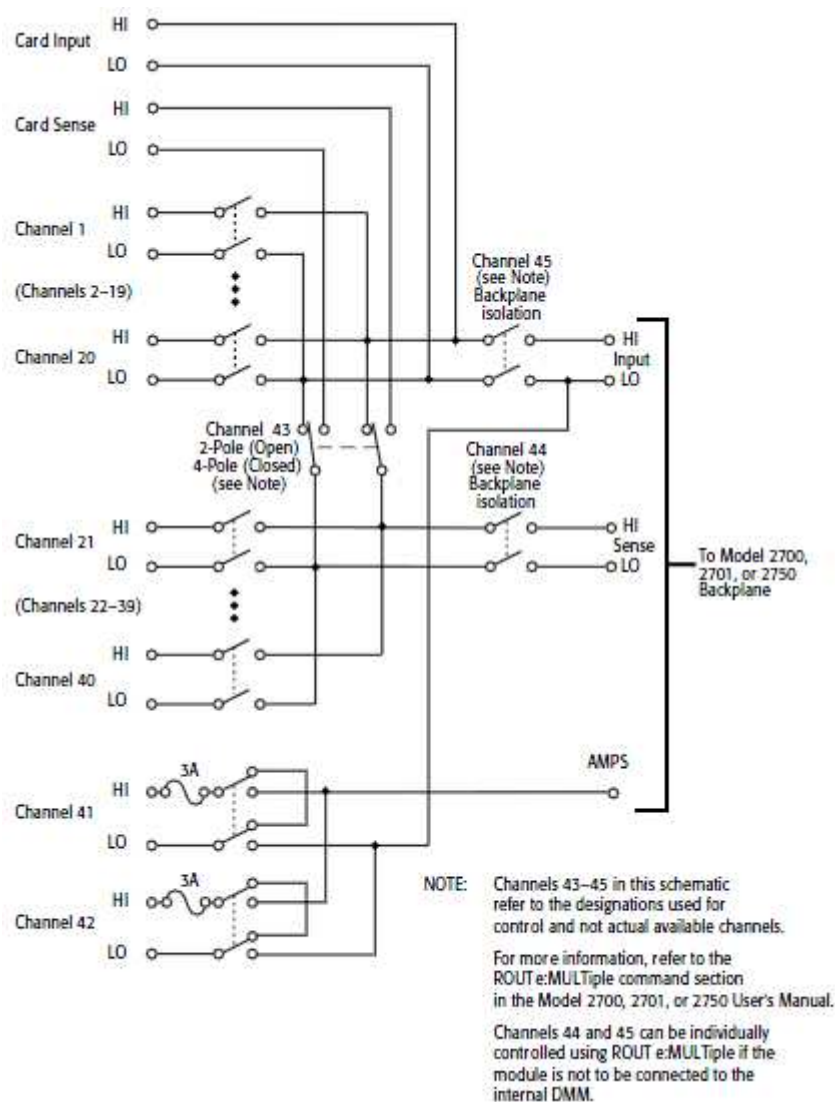
**Tarjeta de adquisición de datos Keithley 2700**  
([www. keithley.com](http://www.keithley.com))

**Características:**

- 40 canales de medida de propósito general.
- 2 canales de medida de solo corriente.
- Permite medidas a 2 o 4 hilos.
- Cada canal soporta 300V y 1 A. 60W 125VA
- Los canales de corriente soportan hasta 3A.
- Conectores de tonillo.
- El cierre de los relés está almacenado en la memoria de la tarjeta.

En la tarjeta se han conectado 20 condensadores en los canales del 20 al 40, para poder ser medirlos a través del *sense*, de la misma forma se han utilizado los canales para medir corriente para conmutar los relés encargados de la alimentación de los condensadores.





Datasheet 7702 Keithley 2700  
([www.keithley.com](http://www.keithley.com))

En el esquema se puede ver la matriz de canales según la hoja de características de la tarjeta de adquisición de datos.

### 3.1.6 CÁMARA

La Moticam 2000 es una cámara digital para microscopía óptica profesional compacta con una cubierta de aluminio ligero y que ofrece una resolución de 2.0 mega

píxeles. La interfaz de captura de la Moticam 200 ofrece características avanzadas en el control de la imagen así como filtración y reducción del nivel en tiempo real.

**Características:**

- Cámara CMOS de ½”.
- 2.0 Mega píxeles (1600x1280) con salida PC USB 2.0.
- Con lentes CCD de 16 mm.
- Adaptadores de oculares de 28 mm, 30 mm, 34 mm y 35 mm.
- Adaptador B&S (para uso en cualquier tubo ocular).
- Rejilla de Calibración
- Macro tubo.
- Tarjeta PCI USB 2.0 PCI incluido.
- Software Motic Images Plus 2.0.



**Cámara Moticam 2000**  
([www.motic.com](http://www.motic.com))

## 3.2 EQUIPAMIENTO LABORATORIO SOFTWARE

### 3.2.1 SISTEMA GPIB

GPIB (*General Purpose Interface Bus*) es un estándar de conexión que permite la comunicación de un ordenador con instrumentos electrónicos de medida, como pueden ser medidores de impedancias, multímetros, osciloscopios, etc. Fue creado en 1965 por la compañía Hewlett-Packard, que lo denominó originalmente HP-IB (*Hewlett-Packard Instrument Bus*).

La IEEE 488.2 define unas características mínimas de la interfaz, un repertorio común de instrucciones, un protocolo de mensajes y un nuevo modelo de informe de estado.

En 1990, la norma IEEE 488.2 incluyó la norma SCPI (*Standard Commands for Programmable Instrumentation*), que define comandos específicos para cada tipo de instrumento y que incluyen todos los fabricantes. SCPI garantiza total compatibilidad entre instrumentos. En los sistemas SCPI es posible cambiar un instrumento por otro equivalente de otro fabricante con total compatibilidad.

El principal objetivo del bus GPIB consiste en gestionar la transferencia de información entre dos o más dispositivos. Antes de enviar los datos hacia los dispositivos éstos deben configurarse de acuerdo con este protocolo de transmisión de información. Entre los parámetros relativos al protocolo se encuentra la asignación de direcciones a los instrumentos interconectados.

La numeración del dispositivo, o asignación de su dirección, se realiza desde el panel frontal o alterando la conexión de los puentes de su tarjeta interfaz, que, normalmente, es accesible desde la parte posterior del instrumento.

El elemento controlador del equipo GPIB es único (generalmente la tarjeta controladora instalada en un PC, en cuyo caso se le asigna la dirección 0), supervisa

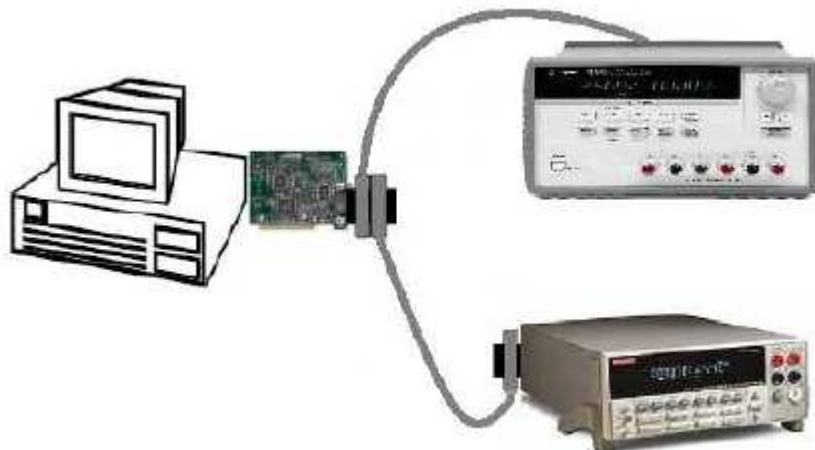
todas las operaciones que se realizan en el bus, y determina el dispositivo que envía la información y el momento en que se realiza su envío. El controlador puede designar un sustituto si en un determinado momento no puede atender los requisitos de control. El nuevo controlador recibe el nombre de controlador activo.

El controlador asegura que no puede haber dos o más instrumentos enviando información al bus simultáneamente. Además, establece los dispositivos que permanecen en estado de recepción o escucha, ya que no todos los instrumentos están siempre interesados en captar la información del bus. Esta función la realiza “despertando” a los dispositivos en estado de “latencia” mediante una solicitud de reafirmación, y mediante órdenes que especifican los nuevos receptores y el nuevo emisor.

Cuando el proceso de transmisión-recepción ha finalizado, el controlador del equipo se asegura de que todos los receptores han recibido la información enviada al bus por el emisor mediante el *data hardware handshake* o control de transferencia de datos.

### 3.2.2 ESQUEMA SISTEMA GPIB

Un sistema GPIB consiste en una serie de instrumentos de medida interconectados a un bus y controlados por un PC dotado de una tarjeta GPIB, o un cable USBGPIB. Existe bastante libertad en la configuración topológica del bus que suele ser una combinación de disposiciones lineales y en estrella. En la siguiente figura se muestra el sistema GPIB gráficamente.



El dispositivo controlador, en este caso con una tarjeta GPIB, gestiona el flujo de datos y comandos a los diferentes elementos del sistema mediante la utilización de un software de captura.

A continuación se muestra una imagen de los cables



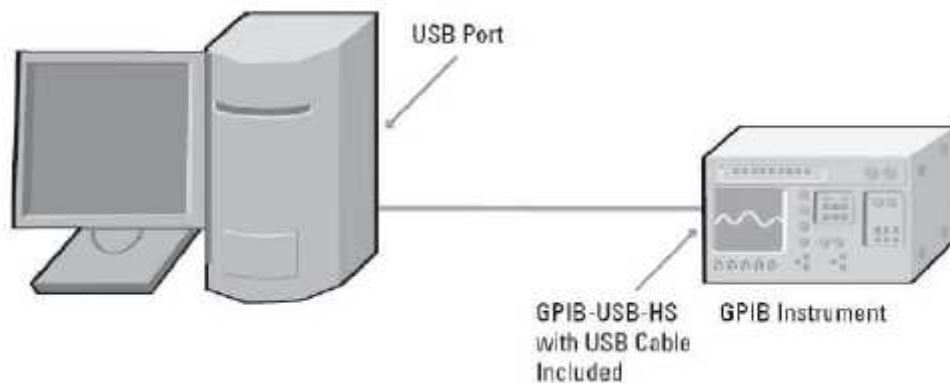
Cada dispositivo del equipo GPIB posee una dirección, codificada como un número entre 0 y 30. Existen 31 direcciones primarias permitidas para instrumentos transmisores de datos conectados al bus interfaz GPIB. A cada instrumento se le asigna una dirección codificada mediante 7 bits. Puede haber hasta 15 dispositivos conectados en un bus contiguo, siendo sólo uno de ellos el controlador. Es decir, a una tarjeta controladora pueden conectarse hasta 14 dispositivos, por ejemplo encadenando cables IEEE-488 de un dispositivo al siguiente. Algunos dispositivos conectados al bus pueden direccionarse también mediante direcciones secundarias. Éstas hacen referencia a alguno de sus bloques funcionales. De los 15 dispositivos conectados no puede haber más de 2/3 de ellos funcionando simultáneamente.

La normativa IEEE - 488 especifica que pueden usarse hasta 20 metros de cable encadenado en línea, contando las conexiones; también recomienda no emplear tramos de cable de más de 4 metros de longitud. La alternativa de conexión en estrella se emplea para aumentar el número de dispositivos interconectados, pero tiene como inconveniente la mayor capacidad parásita de la red, que introduce retardos y, en consecuencia, errores de transmisión.

La velocidad de la señal es de 1 Mbyte por segundo en distancias cortas. Es usual es un valor comprendido entre 250 y 500 kilobytes/segundo.

### 3.2.3 CONTROLADOR GPIB HS HUB

El controlador GPIB para USB 2.0 de alta velocidad de *National Instruments* transforma cualquier ordenador con un puerto USB en un controlador completo IEEE 488.2 *plug-and-play* para hasta 14 instrumentos GPIB programables. NI GPIB-USBHS aprovecha el USB 2.0 de alta velocidad para brindar un rendimiento superior de hasta 1.8 MB/s con el protocolo IEEE 488 estándar y 7.2 MB/s con el protocolo IEEE 488 de alta velocidad (HS488). De esta forma, no se requiere de un cable GPIB para la conexión de un instrumento. En el caso de necesitar conectar varios instrumentos, éstos se conectarán mediante sus respectivos cables GPIB y se conectará el GPIB-USB-HS en la terminación final, de manera que se queden todos los instrumentos conectados al ordenador a través del puerto USB de la misma manera que se haría a través de una tarjeta GPIB, tal y como se muestra aquí



Una de las herramientas de programación para este tipo de dispositivos más potentes y sencillas de utilizar es LabVIEW de Nacional Instruments. Su alta potencialidad permite configurar y manejar de forma sencilla los instrumentos a través de la interfaz GPIB. La herramienta LabVIEW está diseñada especialmente para monitorizar, controlar, automatizar y realizar cálculos complejos de señales analógicas y digitales capturadas a través de tarjetas de adquisición de datos, puertos serie y GPIBs.

Es un lenguaje de programación de propósito general, como es el Lenguaje C o Visual Basic, pero con la característica de que es totalmente gráfico, facilitando de esta manera el entendimiento y manejo de dicho lenguaje para el diseñador y/o programador.

Se trata de un sistema abierto, en cuanto a que cualquier fabricante de tarjetas de adquisición de datos o instrumentos en general puede proporcionar el driver de su producto en forma de VI dentro del entorno de LabVIEW. También es posible programar módulos para LabVIEW en lenguajes como C y C++; estos módulos son conocidos como sub-VI y no difieren de los VI creados con LabVIEW salvo por el interfaz del lenguaje en el que han sido programados.

La herramienta incluye librerías para el manejo de:

- Interfaces de comunicaciones:

- Puerto serie

- Puerto paralelo

- GPIB

- PXI

- VXI

- TCP/IP, UDP, DataSocket

- IrDA

- Bluetooth

- USB

- OPC...

- Capacidad de interactuar con otras aplicaciones:
  - dll
  - ActiveX
  - Matlab
  - Simulink...
- Herramientas para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición, análisis, presentación y almacenamiento de datos e imágenes.
- Control de movimiento.
- Tiempo Real estrictamente hablando.
- Programación de FPGAs.
- Sincronización.

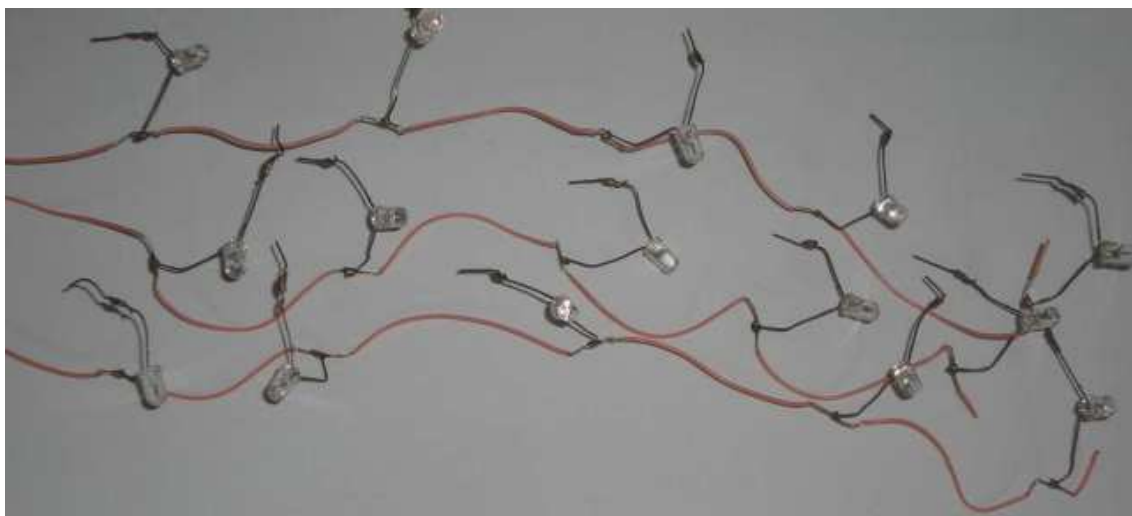
Está basado en la programación modular, lo que permite crear tareas muy complicadas a partir de módulos o sub-módulos mucho más sencillos. También ofrece la ventaja de *debugging* en cualquier punto de la aplicación. Permite la posibilidad de poner *break points*, ejecución paso a paso, ejecución hasta un punto determinado y se puede observar como los datos van tomando valores a medida que se va ejecutando la aplicación.



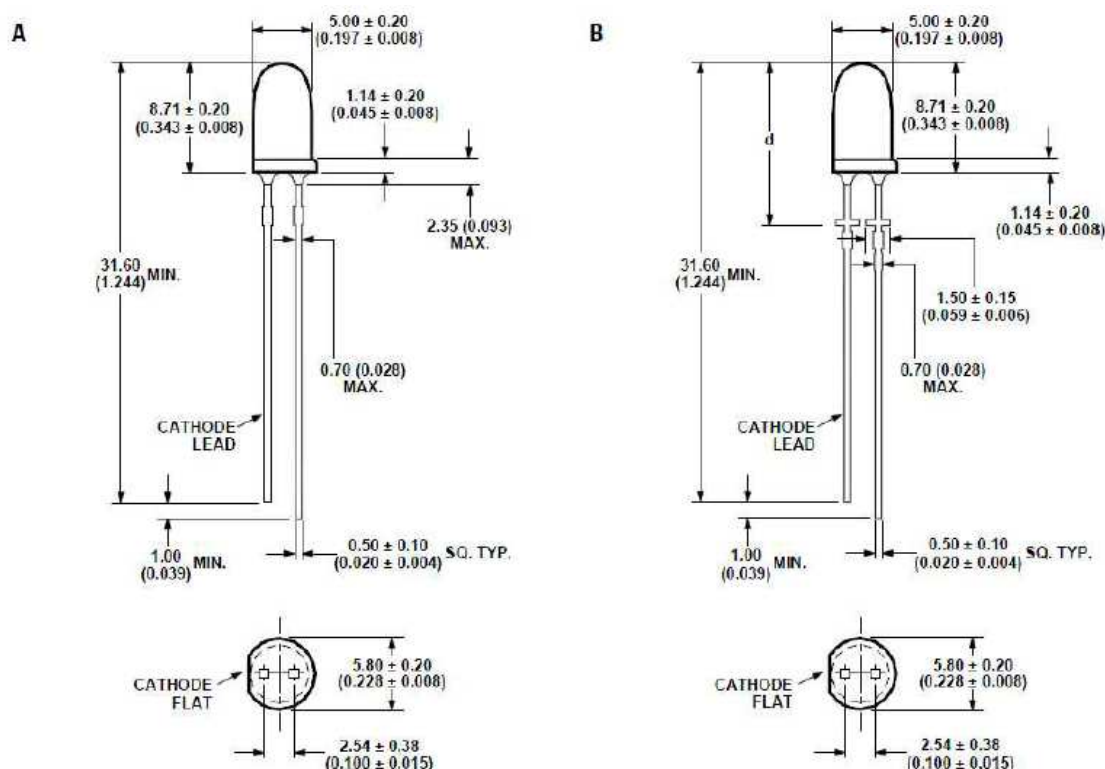
## 4. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS Y TOMA DE MUESTRAS

### 4.1 LAS MUESTRAS

Se han utilizado LED de AlInGaP de color rojo (longitud de onda 626/630 nm), con lo que la separación entre el nivel mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia es de unos 1,97 eV. El encapsulado es el T-1 ¾ (5 mm) de epoxi transparente. La eficiencia luminosa está entre 150 y 155 lm/w para una corriente de 20 mA. Se han utilizado 15 LED por ensayo, que estarán unidos por el ánodo en tres tiras de cinco LED tal y como se puede observar en la fotografía



## 4.2 HOJA DE CARACTERÍSTICAS



Electrical/Optical Characteristics Table  
 $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
Forward Voltage						$I_F = 20\text{ mA}$
Amber ( $\lambda_d = 590\text{ nm}$ )	$V_F$		2.02	2.5	V	
Red ( $\lambda_d = 626\text{ nm}$ )			1.90	2.5		
Amber ( $\lambda_d = 592\text{ nm}$ )			2.15	2.5 <sup>[1]</sup>		
Red ( $\lambda_d = 630\text{ nm}$ )			2.00	2.5 <sup>[1]</sup>		
Reverse Voltage	$V_R$	5	20		V	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$
Peak Wavelength						Peak of Wavelength of Spectral Distribution at $I_F = 20\text{ mA}$
Amber ( $\lambda_d = 590\text{ nm}$ )	$\lambda_{PEAK}$		592		nm	
Red ( $\lambda_d = 626\text{ nm}$ )			635			
Amber ( $\lambda_d = 592\text{ nm}$ )			594			
Red ( $\lambda_d = 630\text{ nm}$ )			639			
Spectral Halfwidth	$\Delta\lambda_{1/2}$		17		nm	Wavelength Width at Spectral Distribution $1/2$ Power Point at $I_F = 20\text{ mA}$
Speed of Response	$\tau_s$		20		ns	Exponential Time Constant, $e^{-t/\tau_s}$
Capacitance	C		40		pF	$V_F = 0$ , $f = 1\text{ MHz}$
Luminous Efficacy						Emitted Luminous Power/Emitted Radiant Power at $I_F = 20\text{ mA}$
Amber ( $\lambda_d = 590\text{ nm}$ )	$\eta_V$		480		lm/w	
Red ( $\lambda_d = 626\text{ nm}$ )			150			
Amber ( $\lambda_d = 592\text{ nm}$ )			500			
Red ( $\lambda_d = 630\text{ nm}$ )			155			
Thermal Resistance	$R\theta_{J-PIN}$		240		$^\circ\text{C/W}$	LED Junction-to-Cathode Lead

### 4.3 DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

El tiempo de duración de cada ensayo era diferente dependiendo de las condiciones (temperatura, humedad y corriente de trabajo) establecidas al inicio del mismo. El único parámetro constante ha sido el intervalo entre medidas para obtener resultados más ajustados a la realidad, evitando factores externos al cálculo. Se han realizado un total de dos medidas diarias con un espacio de tiempo de 6 horas entre cada medida diaria, constituidas por 5 horas de trabajo de la cámara climática, más una hora de enfriamiento. El momento en el que se daba por finalizado un ensayo es cuando todas las muestras del mismo habían fallado.

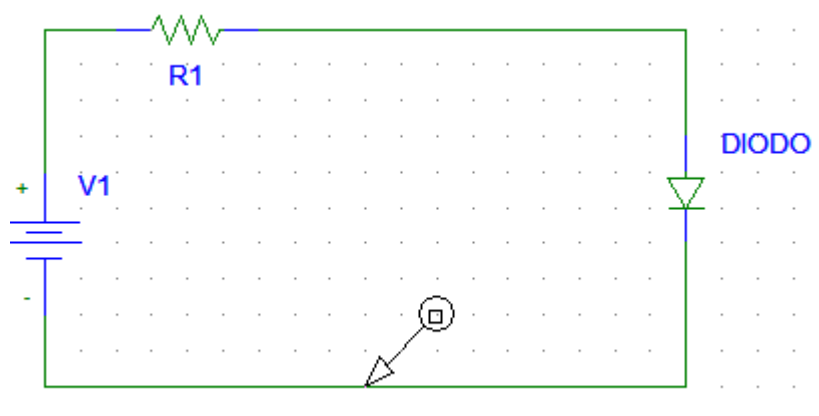
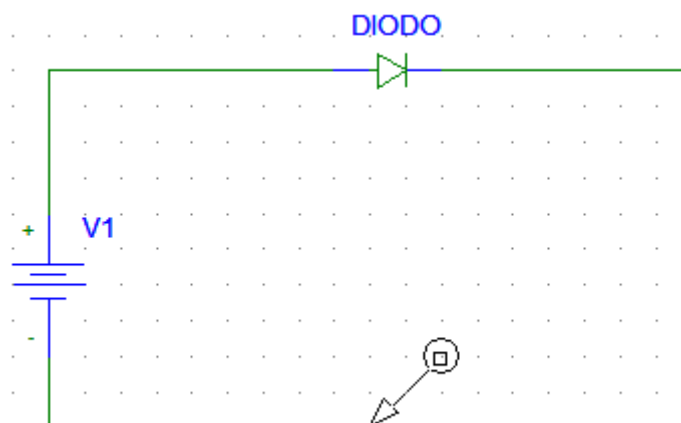
### 4.4 MEDIDAS DE POTENCIA LUMINOSA

Estas medidas se tomaban al extraer las muestras de la cámara climática. Para obtenerlas se ha utilizado el medidor de potencia lumínica MS9020B. Se han tomado dos medidas de luminosidad sin resistencia de polarización limitando la fuente a 20 mA y con resistencia de polarización de 120 ohmios limitando la fuente a 4.8 V.

En la medida sin resistencia se conectaban los LED a la fuente de alimentación con una limitación de 20 mA., se medía la potencia lumínica y además se ponía en serie un amperímetro para medir la corriente que circulaba a través del diodo. De esta forma las medidas se tomaban en las condiciones que recomienda el fabricante como punto de trabajo.

En la medida con resistencia era exactamente igual que la anterior, pero en este caso se incorporaba una resistencia de 120 ohmios en serie con el diodo y se limitaba la fuente a 4,8V consiguiendo así que el punto de trabajo del LED fuera diferente. En las hojas del fabricante encontramos que la tensión típica de conducción del LED es de 2,0 voltios, por lo que la corriente tendrá un valor aproximado de 20 mA. Al no limitar la corriente del LED, conseguimos variar su punto de trabajo.

Aquí vemos dos esquemas ejemplo de las dos medidas, sin resistencia y con ella, respectivamente, además del amperímetro para obtener las medidas de corriente en cada caso.



#### 4.4 GRAFICAS I-V

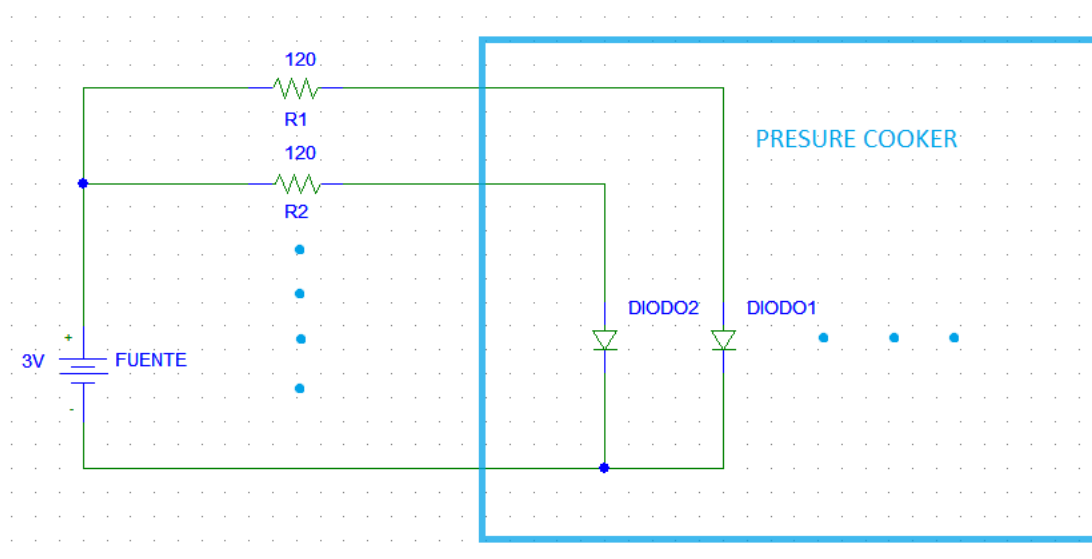
Una vez hechas las medidas de potencia luminosa, se calculaban las gráficas I-V de cada LED a través de un programa diseñado en el Labview por un compañero de la facultad. Para realizar las medidas de tensión se utilizaban dos de los canales del multímetro, descrito anteriormente. En estos canales se medían los valores de tensión que caían en la resistencia de polarización y los valores de tensión de la fuente.

Sabiendo que la tensión del LED se calcula como la diferencia de tensión entre la fuente y la resistencia y que la corriente que circula por el LED es la división de la tensión de la resistencia entre su valor se obtenía la relación de tensiones y corrientes del LED muestreaba los valores de la gráfica I-V en cada momento del ensayo a través del BUS del PC que era quien controlaba el proceso de medida y conmutación de canales con la herramienta de LabView.

#### 4.5 MEDIDAS EN LA CÁMARA CLIMÁTICA

Por último, para finalizar, se devolvían los LED a la cámara climática. Mientras las LED estaban dentro de la cámara, las medidas se seguían haciendo en intervalos de tiempo de 15 minutos a través de un multímetro junto con una matriz de conmutación y una fuente de alimentación. Como en el caso anterior, la herramienta que controlaba este proceso era el LabView a través del PC. De esta forma se obtenían los datos de tensión en cada uno de los LED del ensayo, incluso dentro de la cámara climática con el fin de detectar fallos por cortocircuito, circuito abierto o por variación de corriente.

A continuación se muestra el esquema de medida de los LED dentro de la cámara climática:



#### 4.7 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

Al terminar cada ensayo, el análisis comenzaba realizando un estudio visual de cada componente de cara a documentar las causas de fallo de cada uno de ellos. En la mayoría de los casos, a simple vista no era sencilla la identificación de los fallos, con lo cual se utilizó una cámara de microscopía con la que pudimos revisar de qué tipo de fallos se trataba en cada caso, antes de realizar el estudio estadístico posterior de fiabilidad.

## 5. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo vamos a presentar los resultados mediante fotografías y gráficas que nos van a permitir resolver el tipo de fallo que ha tenido cada componente de cada uno de los ensayos que hemos realizado.

La categorización de cada caso de fallo vendrá en función de unos criterios previos, que vamos a exponer con anterioridad a continuación, con la intención de que quede claro el concepto tanto de fiabilidad como de casos de fallo.

### 5.1 CONCEPTO DE FIABILIDAD

La fiabilidad es una medida del éxito con el que un sistema se ajusta a alguna especificación definitiva de su comportamiento. Cuando el comportamiento de un sistema se desvía del especificado para él, se dice que es un fallo. Esto se tiene en consideración siempre que las condiciones en las que se evalúa sean las adecuadas para el funcionamiento del sistema o componente, en su margen de funcionamiento o zona de trabajo.

Los fallos son el resultado de problemas internos no esperados que el sistema manifiesta eventualmente en su comportamiento externo. Estos problemas se llaman errores, y sin causas mecánicas o algorítmicas se denominan defectos.

Categorizando los fallos podemos decir que un fallo catastrófico es aquel que no permite que un componente o sistema entre en su zona de funcionamiento en las condiciones establecidas para ello. Suelen ser fallos repentinos y que necesitan, cuando es posible, de reparación. Mientras, un fallo por degradación es el fallo al que se llega después de una pérdida de condiciones de funcionamiento progresiva y lenta,

en muchos casos. El resultado suele ser el componente o sistema fuera de los márgenes de funcionamiento en los que debe trabajar en condiciones normales.

Los esfuerzos ambientales naturales son debidos a la influencia que provocan algunos agentes ambientales externos sobre el sistema o componente, aumentando la probabilidad de fallo. También se consideran parte de este tipo de esfuerzos los inducidos por el resto de elementos del sistema que alteran la probabilidad de fallo del dispositivo. Estos fallos pueden no provocar fallos catastróficos, pero si provocan una degradación en los mismos.

Los esfuerzos operativos son aquellos que afectan al funcionamiento del dispositivo mediante agentes externos, como corriente, tensión o calor, y pueden provocar fallos catastróficos.

## 5.2 TIPOS DE FALLOS

Evidentemente, los componentes no son iguales entre sí aunque procedan de un mismo lote de fabricación, puede haber algunos con defectos de fabricación. Además, la mayoría de los componentes envejecen, es decir, pierden resistencia al fallo. Este modelo conceptual da lugar a una clasificación de los fallos:

- **Fallos infantiles:** Son los debidos a un defecto de la pieza como resultado de una deficiencia de diseño, fabricación o inspección. Los fallos que ocurren durante la fase de investigación y desarrollo de un programa suelen ser fallos infantiles.
- **Fallos por desgaste:** En los que el componente pierde la resistencia al fallo por su utilización, son causados por el simple uso del mismo.
- **Fallos aleatorios:** Ocurren por picos de tensión, mal uso del componente y demás acciones que no estén dentro de los márgenes de un ensayo sin errores en la ejecución.



Así mismo, los fallos pueden dividirse en dos grandes grupos, los fallos primarios, aquellos en los que un componente o sistema falla por sí solo, o lo que es lo mismo, el fallo de otro componente no provoca una reacción con tendencia al fallo en los demás. En este caso, cuando falle cualquier otro componente será un fallo primario.

Por el contrario, los fallos inducidos por el fallo de otro componente son fallos secundarios.

### 5.3 RESUMEN DE ENSAYOS REALIZADOS

Aquí presentamos el resumen de los ensayos realizados y las condiciones correspondientes a cada uno de ellos, así como la duración en horas de cada uno, en total ocho ensayos.

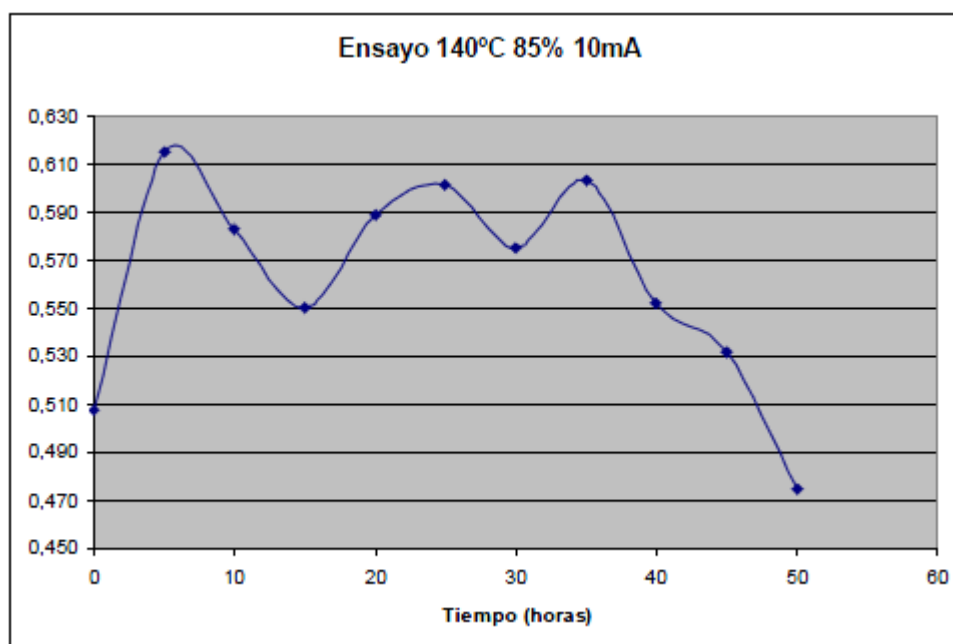
Temperatura	Humedad	Corriente de trabajo	Duración
140 °C	85%	10 mA	80
140 °C	70%	10 mA	105
120 °C	85%	10 mA	280
120 °C	85%	30 mA	240
140 °C	70%	30 mA	80
140 °C	85%	30 mA	50
140 °C	60%	30 mA	85
140 °C	85%	20 mA	55

En las siguientes páginas haremos una breve descripción del caso de fallo de cada uno de los LED (son  $15 \times 8 = 120$  componentes) y un escueto resumen de los resultados en conjunto de las gráficas de potencia y tiempo de cada ensayo concreto.

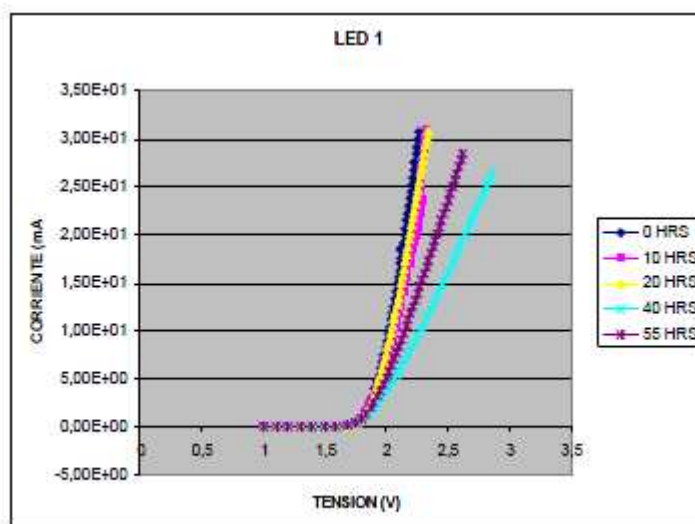
### 5.3.1 ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA

En este ensayo, el detalle más curioso es la aparición de dos fallos infantiles debido a la rotura del ánodo de dos de los LED. La duración total es de 75 horas, aunque uno de los LED no llegó a fallar de forma catastrófica.

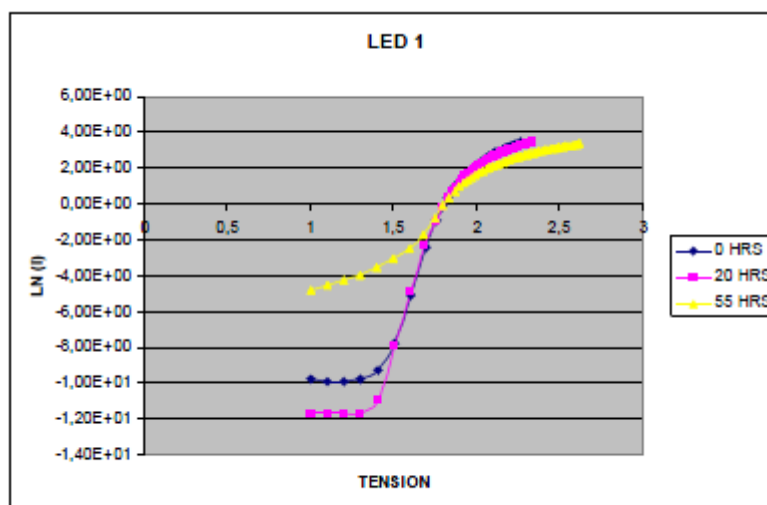
Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 50 horas debido a que los resultados a partir de las 55 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



A continuación y, como haremos para el resto de los ensayos, vamos a analizar uno por uno cada uno de los LED, atendiendo a las premisas de análisis comentadas anteriormente, relacionadas con la potencia en función del tiempo, las gráficas de tensión y corriente, y el estudio visual de cada uno, a través de la cámara de precisión.

**LED 1**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

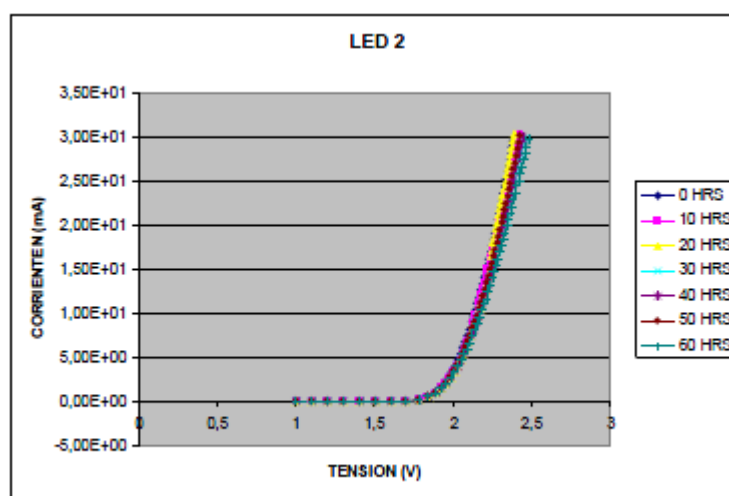
En este LED el tiempo de fallo aparece a las 55 horas, con una potencia máxima presentada a las 5 horas. Según las gráficas, se observa como existe un aumento de  $R_s$  a medida que pasa el tiempo, así como una variación de la corriente de saturación. Además, vemos como en la gráfica I-V existe una variación importante, sobre todo con las cuarenta y cincuenta horas.



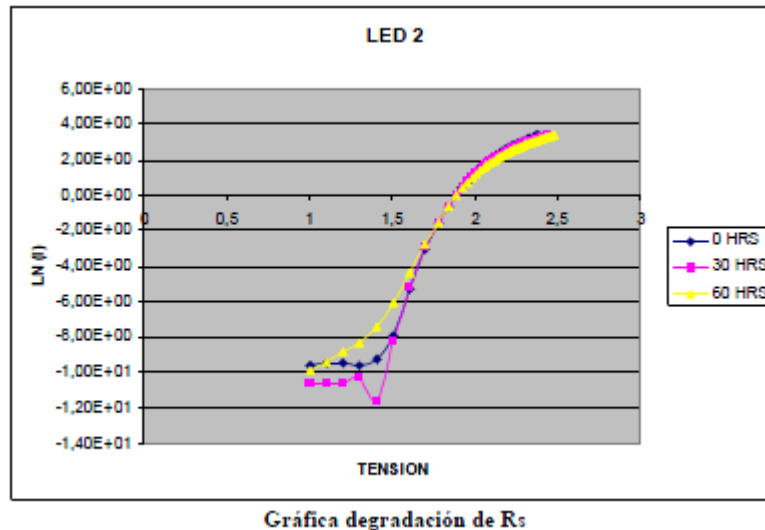
Foto: Anodo oxidado

El fallo se produjo debido a un circuito abierto, en la foto vemos como la humedad ha penetrado en el ánodo del diodo haciendo que se produzca el fallo.

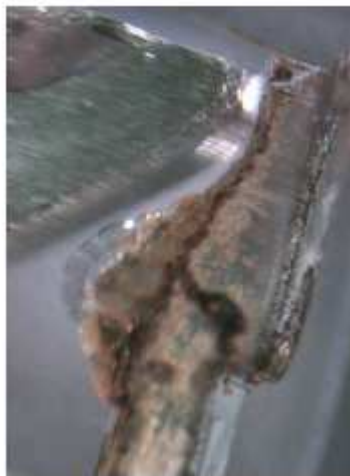
## LED 2



Gráfica V-I



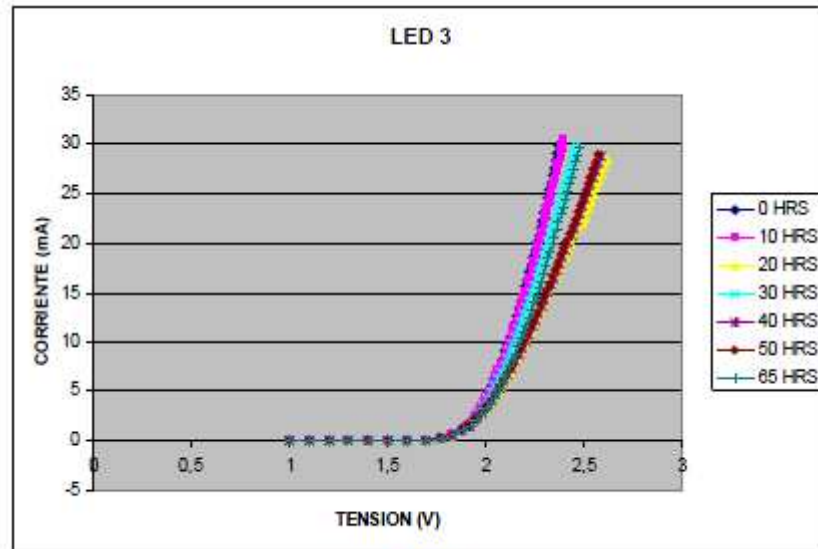
Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto, y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas, tiempo en el que la potencia lumínica empieza a disminuir. Se aprecia una ligera degradación de la curva I-V. La corriente de saturación se incrementa muy ligeramente.



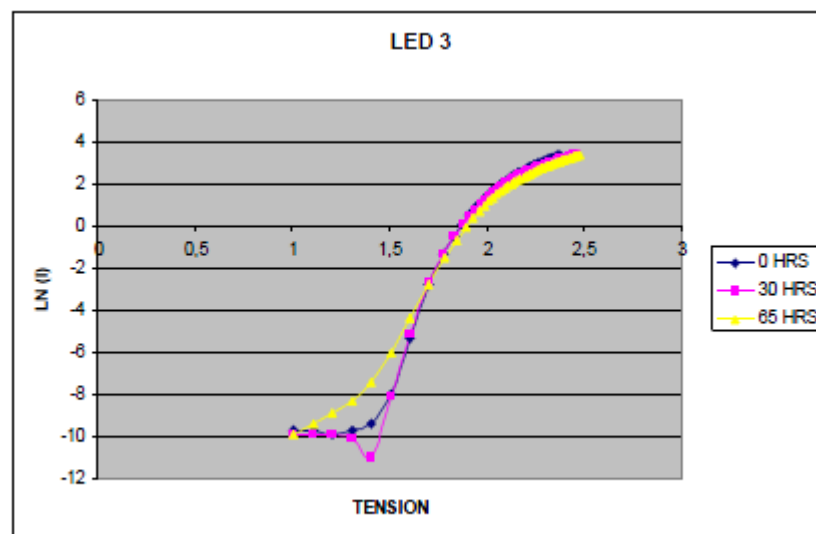
**Foto: Ánodo oxidado**

En la foto vemos como ha entrado la humedad en el ánodo del componente.

## LED 3



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

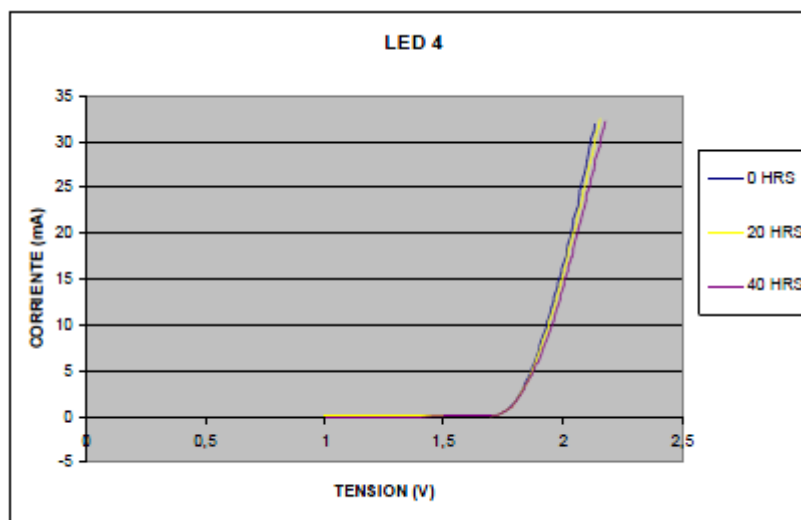
Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto. Además se comprobó la potencia luminosa decreció a las 10 horas de ensayo. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. También se aprecia bastante degradación de la curva I-V.



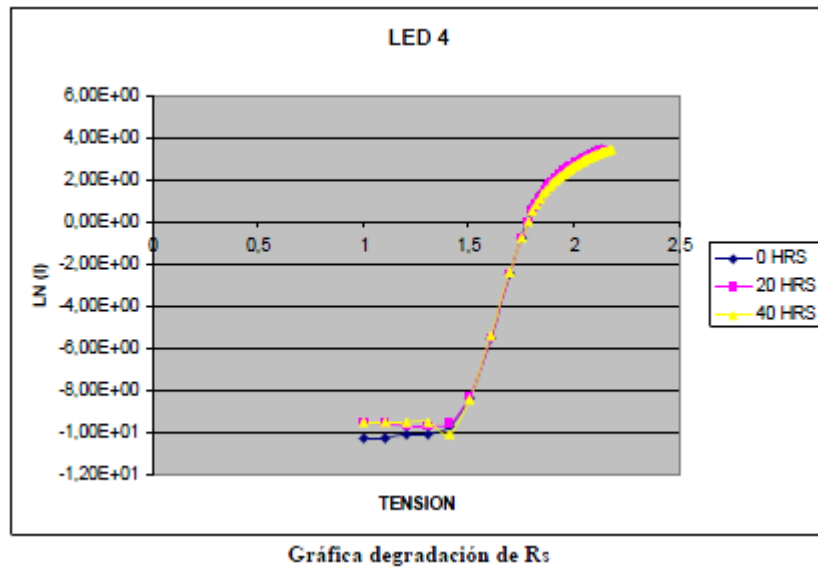
Foto: Anodo oxidado

De nuevo se comprueba la penetración de humedad y la oxidación del ánodo.

#### LED 4



Gráfica V-I



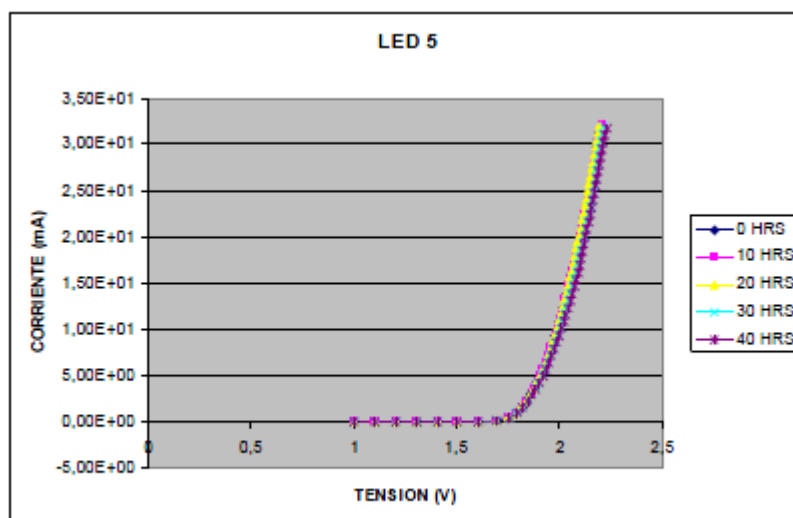
Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto, y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se puede apreciar en las gráficas que a medida que pasa el tiempo se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. No hay casi degradación de la curva I-V.



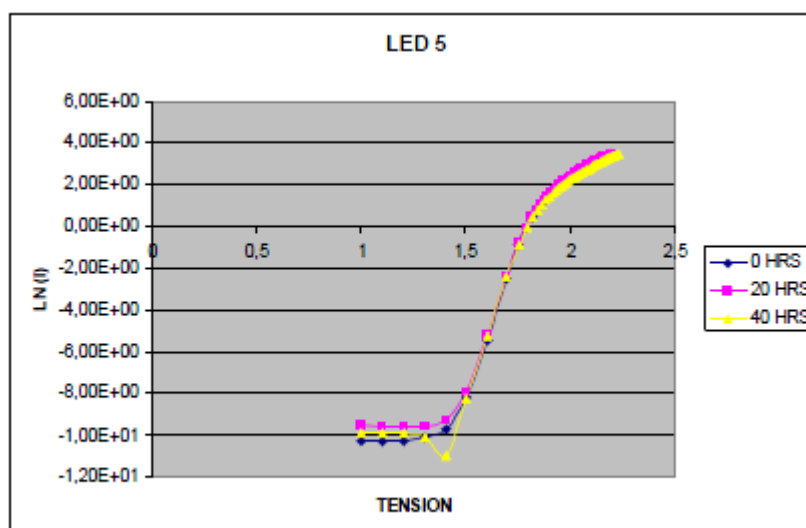
Vemos el ánodo oxidado.



## LED 5



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

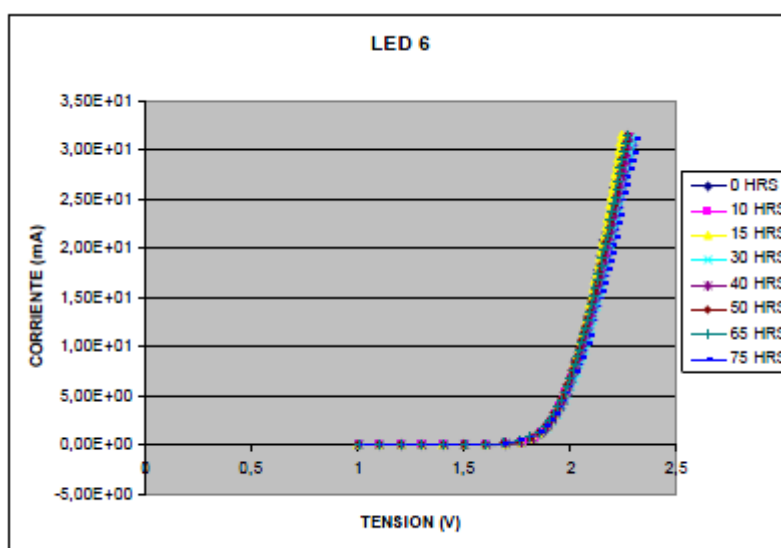
Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto, y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. No se observa apenas degradación de la curva I-V.



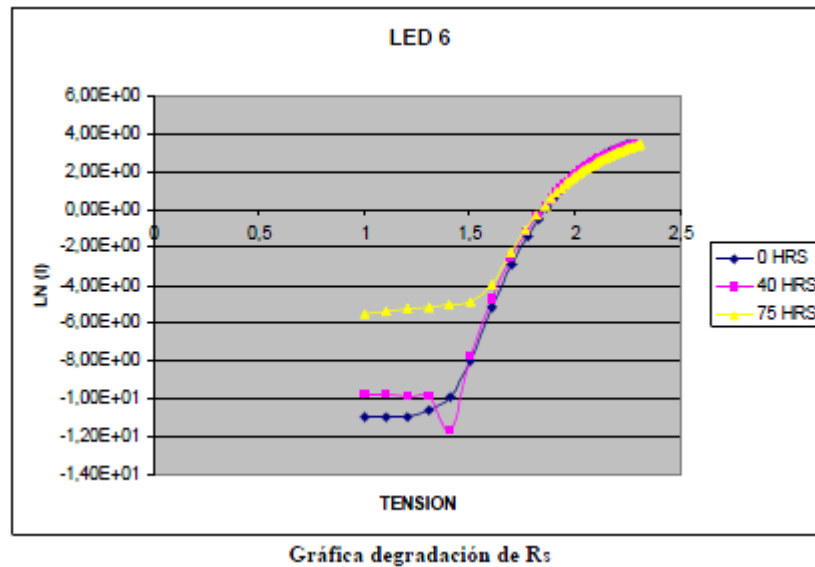
Foto: Ánodo oxidado

Podemos ver como en la foto el óxido llega incluso al *wire bonding* del diodo.

### LED 6



Gráfica V-I



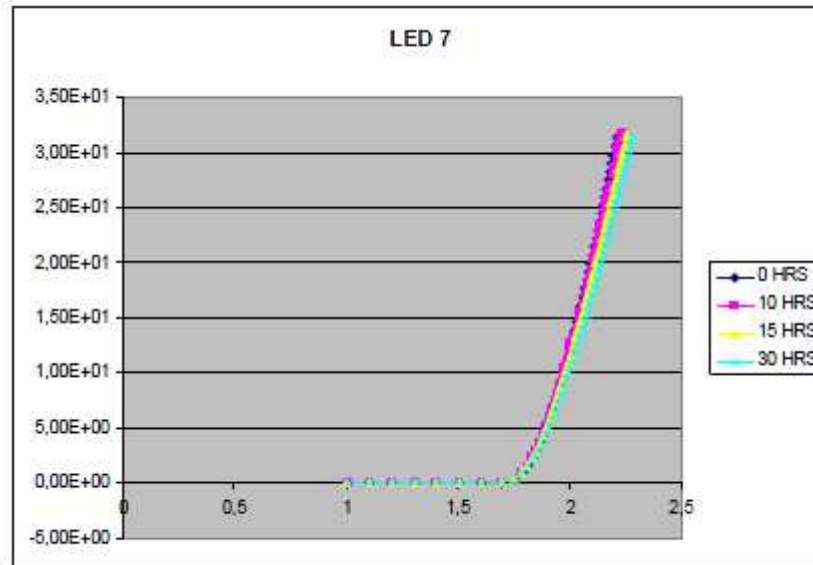
Este diodo no presentó fallo durante el tiempo del ensayo. Alcanzó su máxima potencia a las 5 horas, aunque su análisis es parecido al que hacemos para el resto de los diodos con fallo, aumento de  $R_s$  y degradación de la curva I-V, además de la variación de la corriente de saturación.



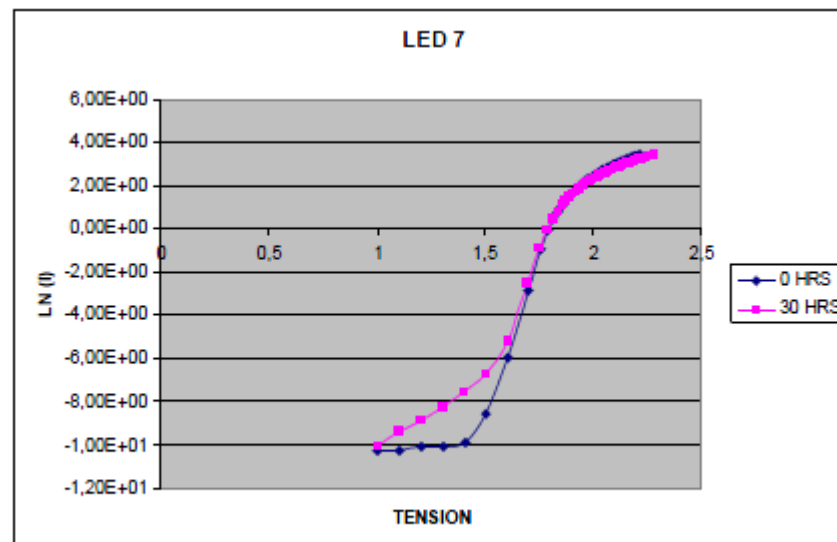
Foto: Ánodo con apenas óxido

En este caso vemos un ánodo prácticamente limpio, sin penetración de humedad.

## LED 7



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 30 horas por circuito abierto, y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se aprecia una ligera degradación de la curva I-V. La corriente de saturación se incrementa ligeramente existe un aumento de  $R_s$ .

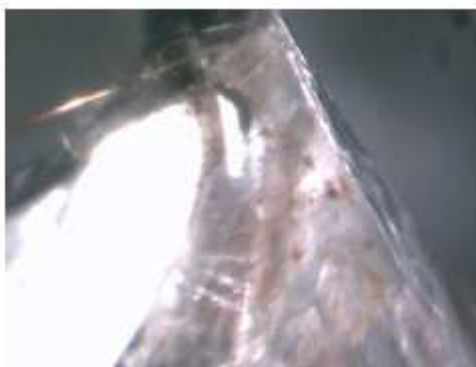
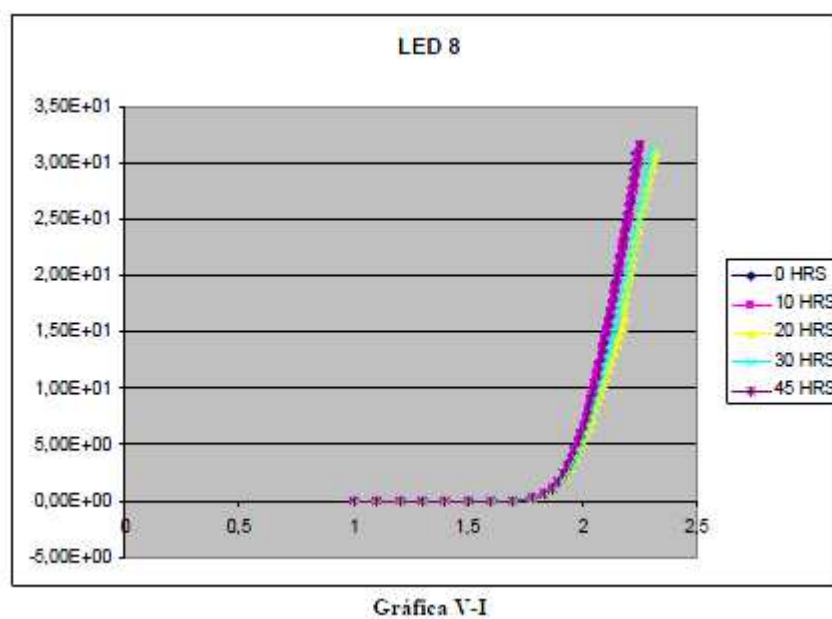
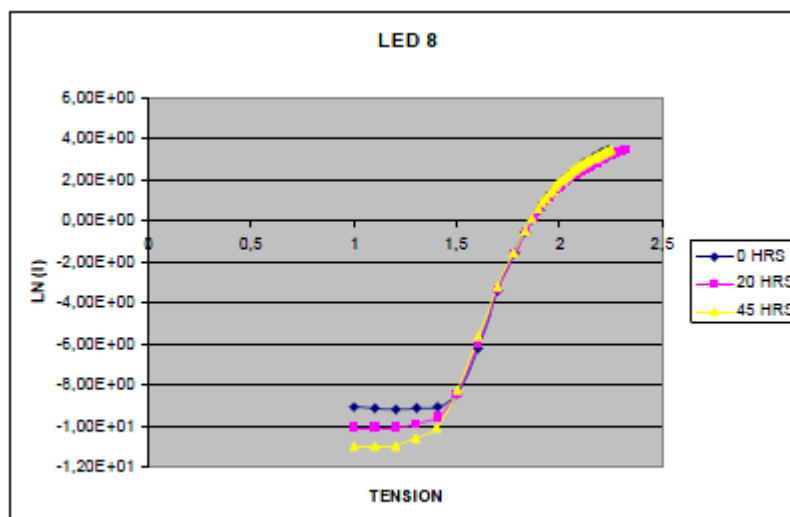


Foto: Ánodo oxidado

Podemos observar el ánodo oxidado de nuevo.

### LED 8



Gráfica degradación de  $R_s$ 

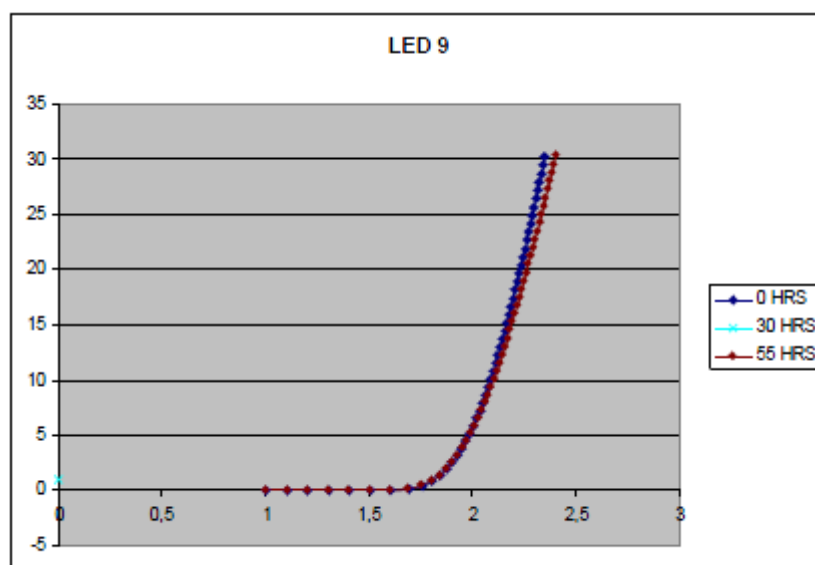
En este diodo, se produjo un fallo infantil por rotura de la pata del ánodo. Por lo tanto, la duración fue de 45 horas, menor de lo que podría haber sido.



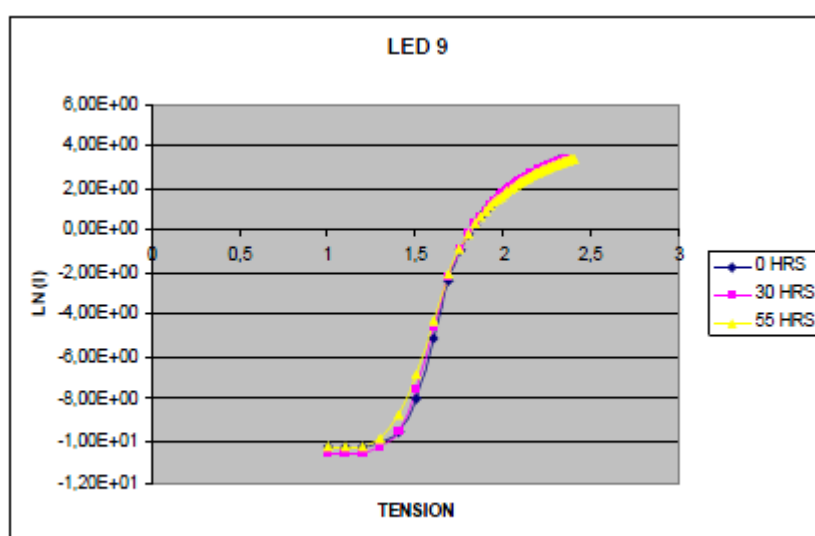
Foto: Patilla de ánodo rota

Se puede apreciar la rotura de la pata del ánodo.

## LED 9



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

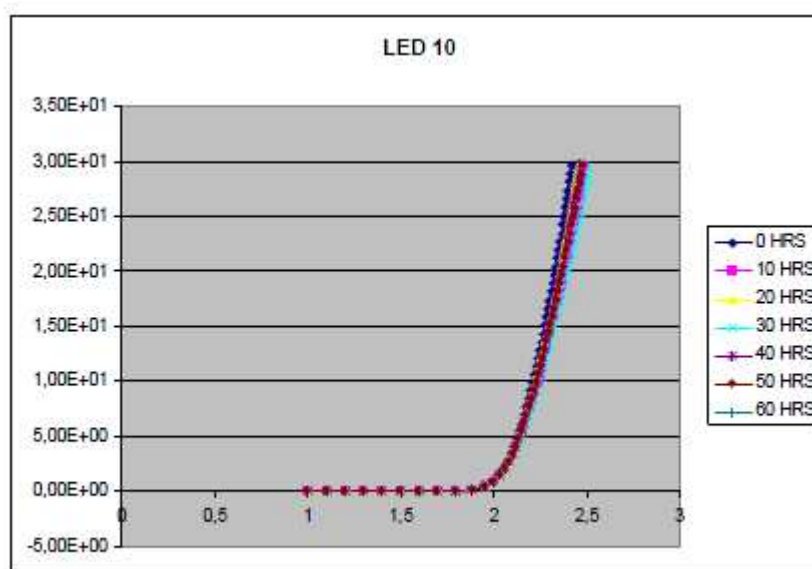
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Muy poca degradación de la curva I-V.



Foto: Ánodo oxidado

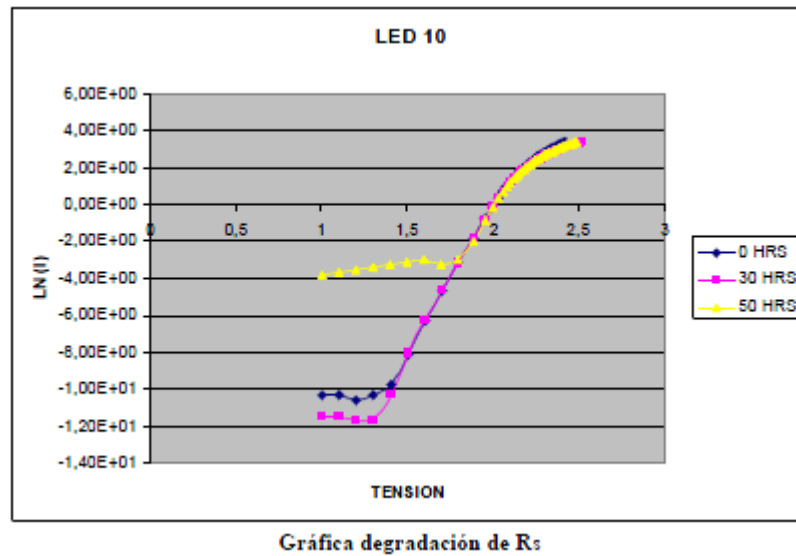
Se comprueba la oxidación del ánodo.

### LED 10



Gráfica V-I





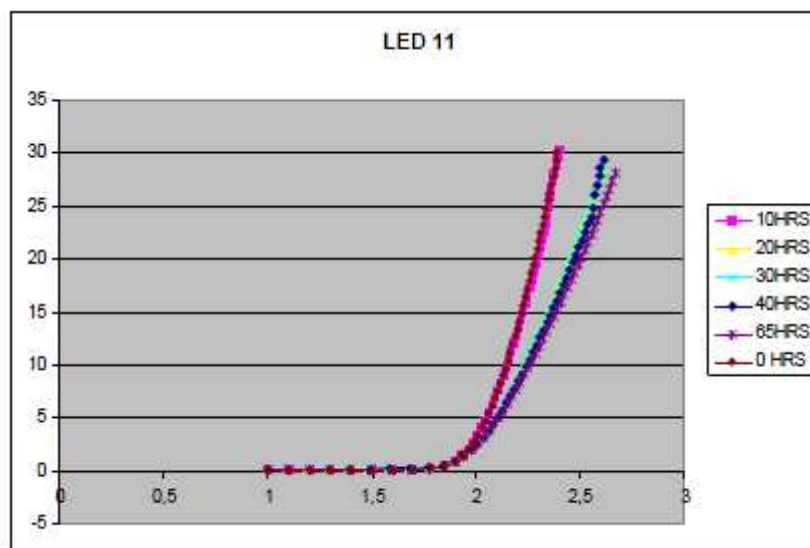
Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. También se aprecia una leve degradación de la curva I-V.



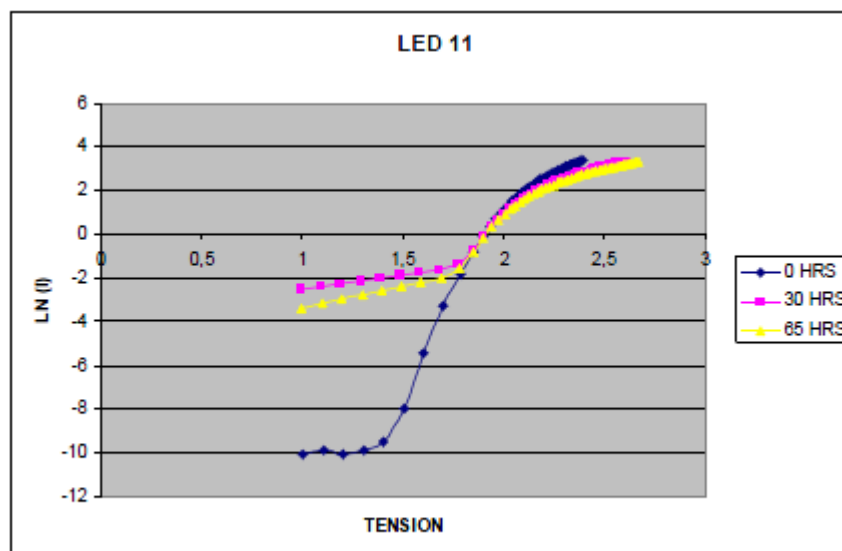
Foto: Ánodo oxidado

De nuevo vemos el óxido claramente.

## LED 11



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

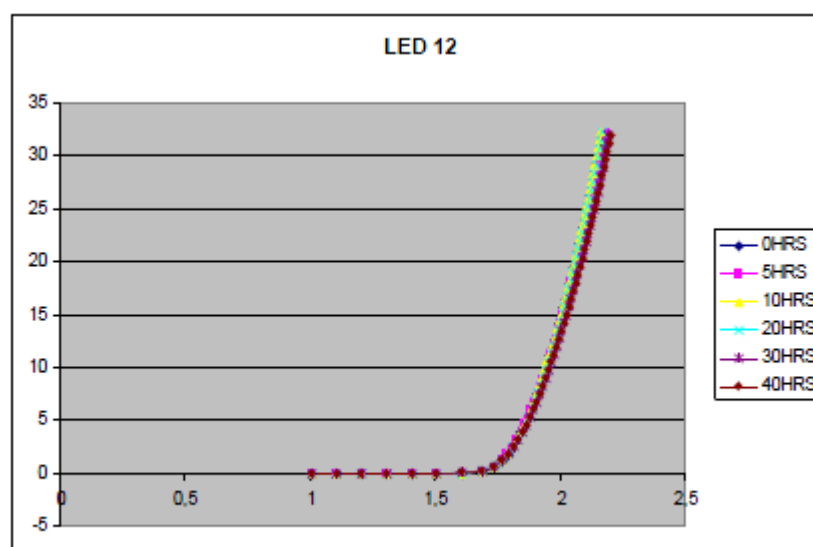
Este diodo presentó fallo a las 70 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



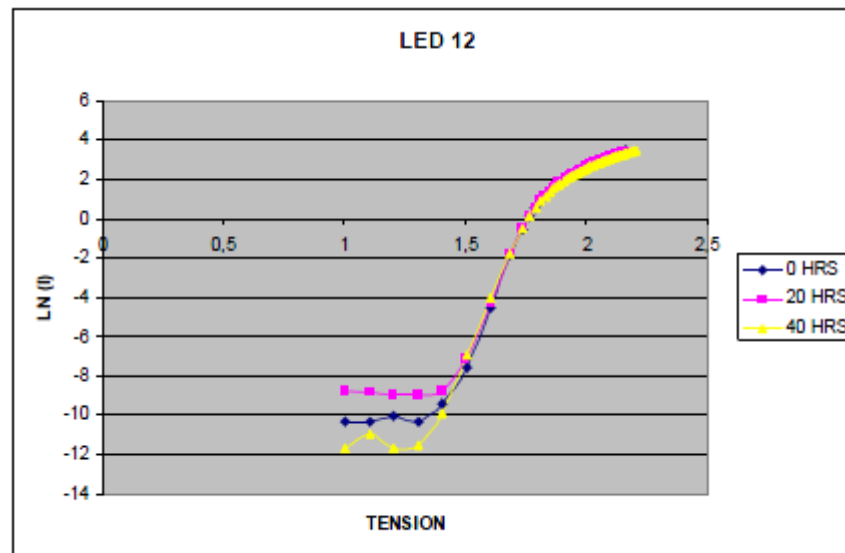
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo visiblemente oxidado.

## LED 12



Gráfica V-I



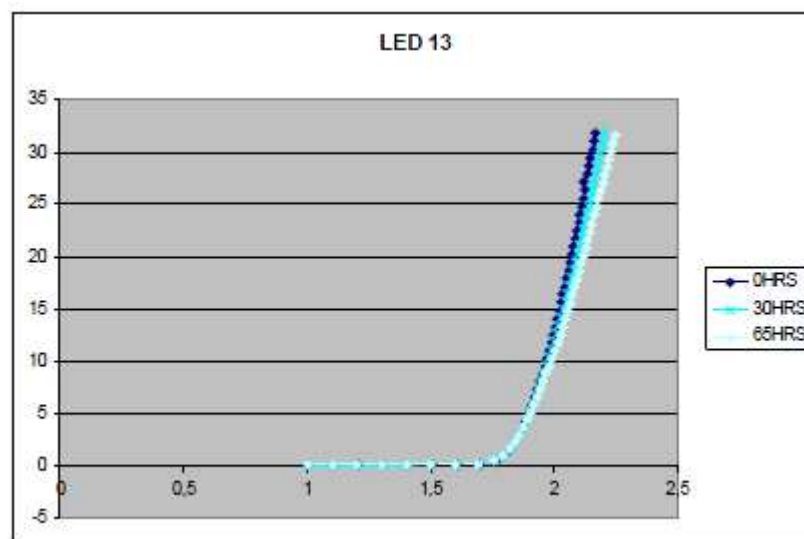
Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Se aprecia una muy leve degradación de la curva I-V.



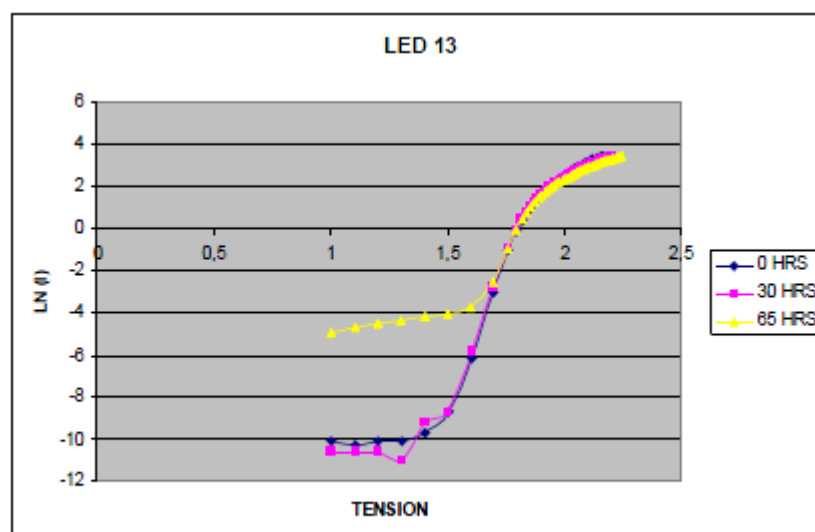
**Foto: Ánodo oxidado**

En este nodo también se observa la oxidación del ánodo.

## LED 13



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

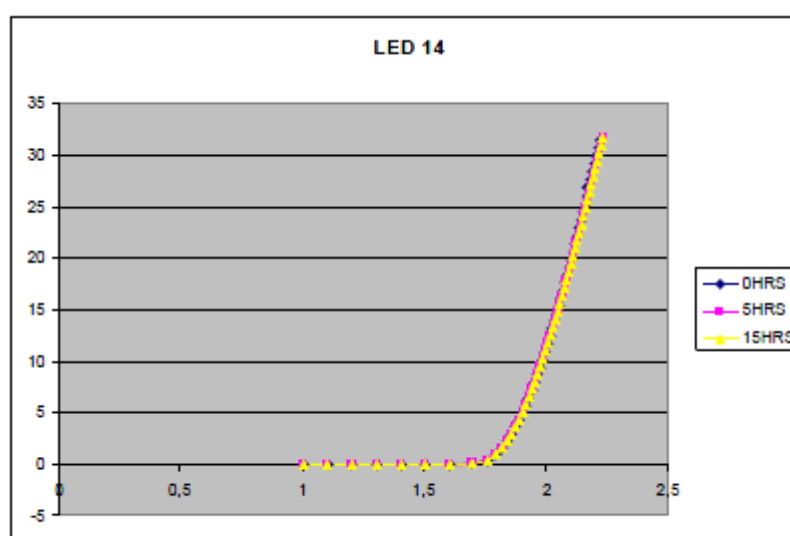
Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Se puede observar una moderada degradación de la curva I-V.



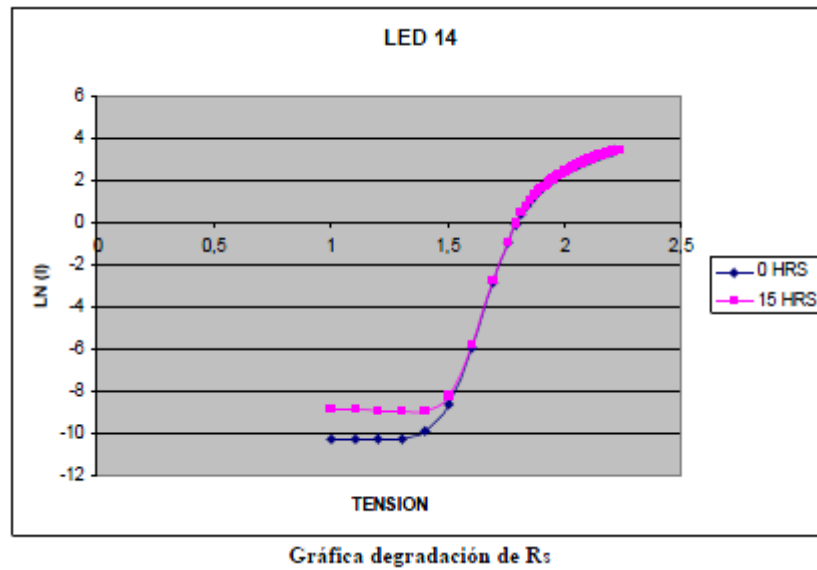
Foto: Ánodo oxidado

El ánodo del diodo, oxidado.

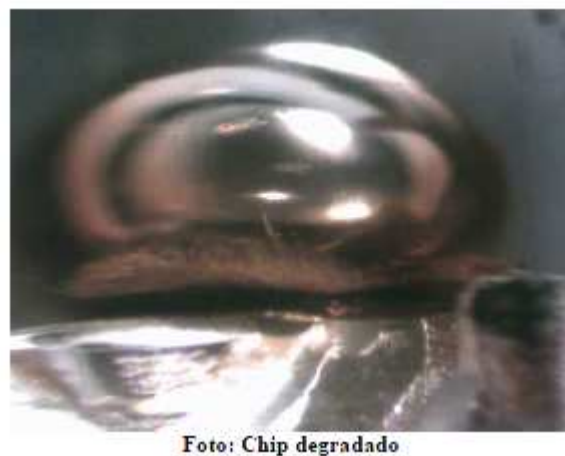
### LED 14



Gráfica V-I

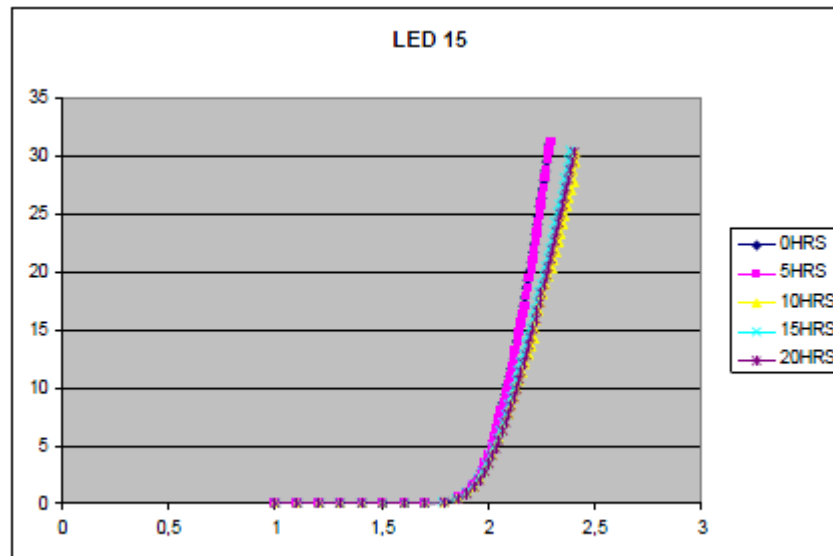


Este diodo presentó fallo a las 15 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Este diodo presentó fallo demasiado temprano, probablemente debido a algún tipo de fallo de fabricación, ya que la humedad penetró en el ánodo muy rápidamente.

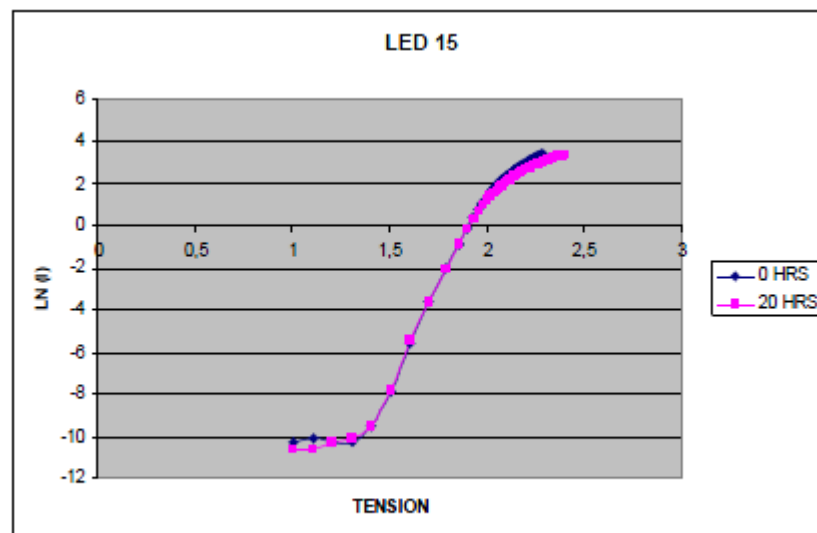


Se observa como se ha creado una burbuja en el chip interno del diodo. La explicación se basa en las altas temperaturas del ensayo y algún fallo de fabricación.

## LED 15



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 20 horas por un fallo infantil, la rotura de la pata del ánodo, al igual que el otro diodo anterior de este mismo ensayo. y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas.





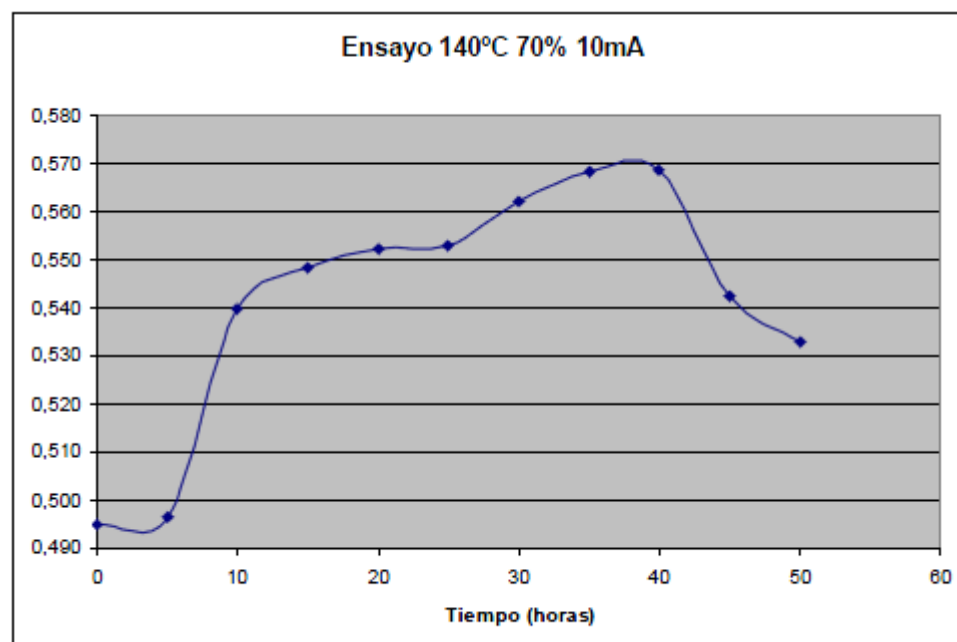
Foto: Penetración de humedad

Podemos ver que, después de la rotura de la pata del ánodo, la humedad ha entrado rápidamente.

#### 5.3.2 ENSAYO 140 °C 70% HUMEDAD RELATIVA A 10mA

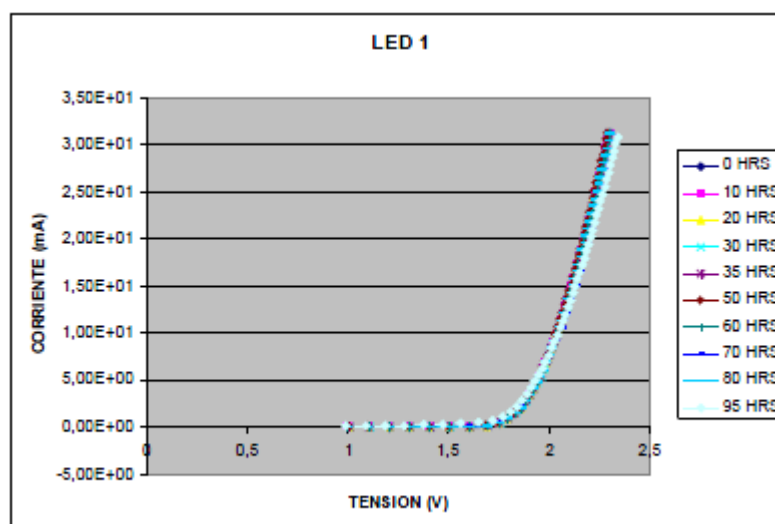
En este ensayo, el detalle más curioso vuelve a ser la aparición de dos fallos infantiles debido a la rotura del ánodo de dos de los LED. La duración total es de 100 horas, aunque uno de los LED no llegó a fallar de forma catastrófica, al igual que en el ensayo anterior. Como salta a la vista, resulta bastante anecdótico que los dos ensayos tengan similares resultados, aunque la duración no es la misma, como era previsible, puesto que la humedad cambia, lo cual nos sirve para el estudio posterior.

Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 50 horas debido a que los resultados a partir de las 55 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED. Como decíamos, tenemos una situación semejante al ensayo de antes.

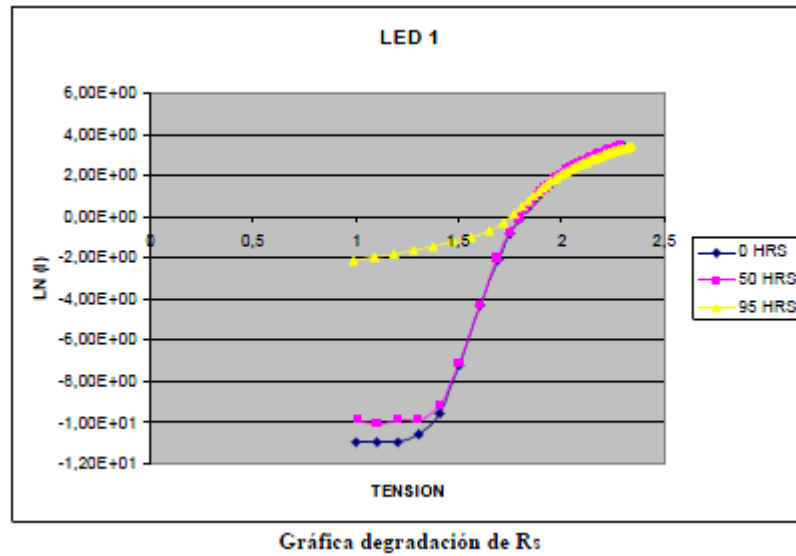


Gráfica de la potencia media del ensayo

### LED 1



Gráfica V-I



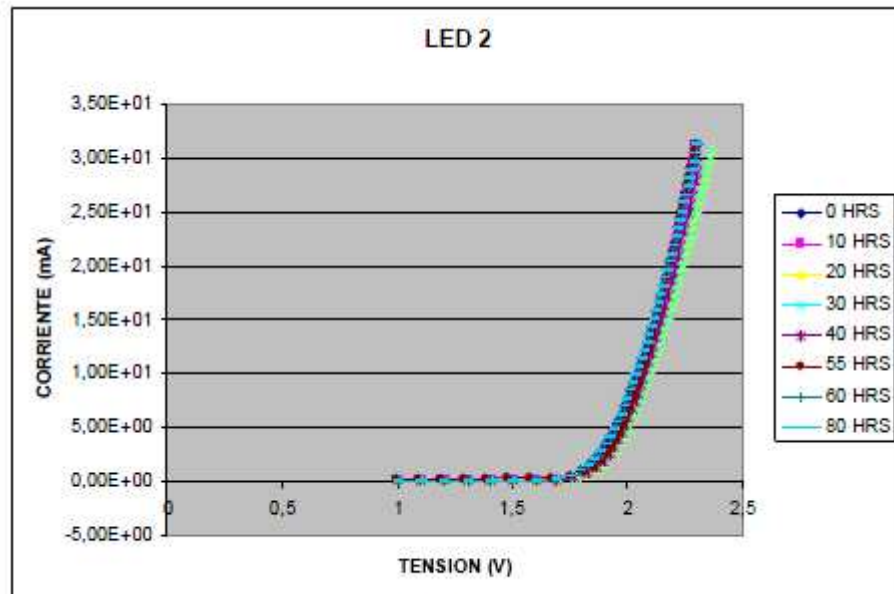
Este diodo presentó fallo a las 95 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 40 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una muy leve degradación de la curva I-V.



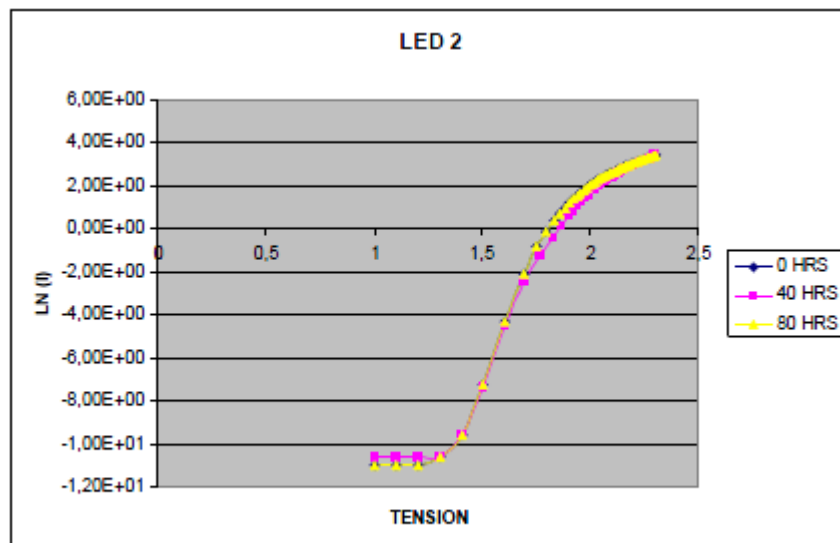
Foto: Ánodo oxidado

Se puede ver el ánodo oxidado.

## LED 2



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

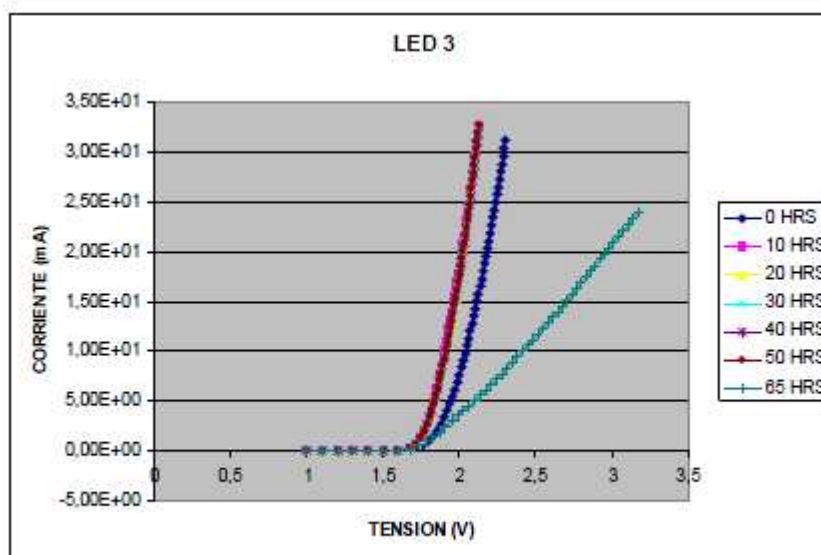
Este diodo presentó fallo a las 90 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 50 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una leve degradación de la curva I-V.



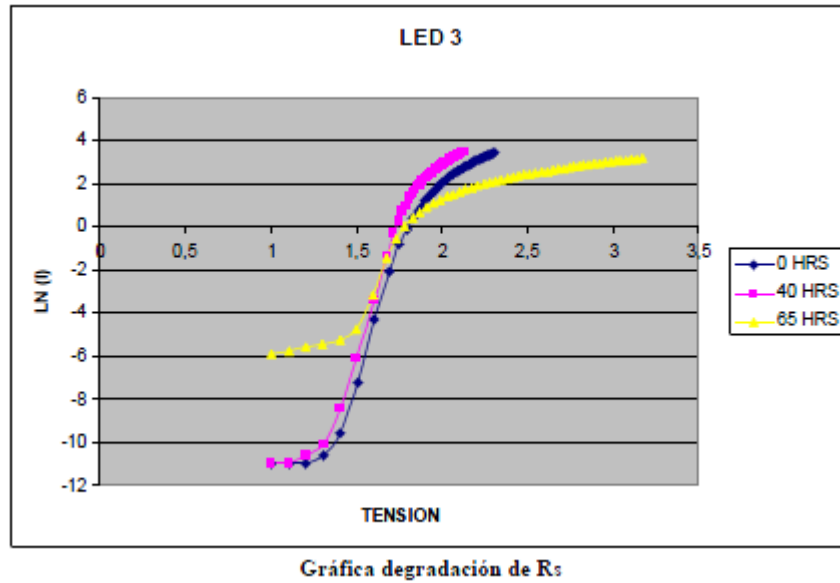
Foto: Ánodo oxidado

En esta foto se observa bastante bien el ánodo oxidado.

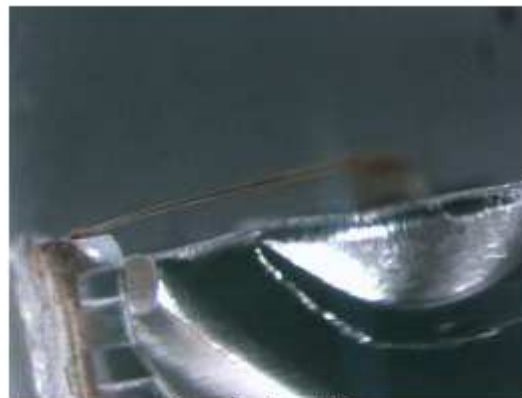
### LED 3



Gráfica V-I

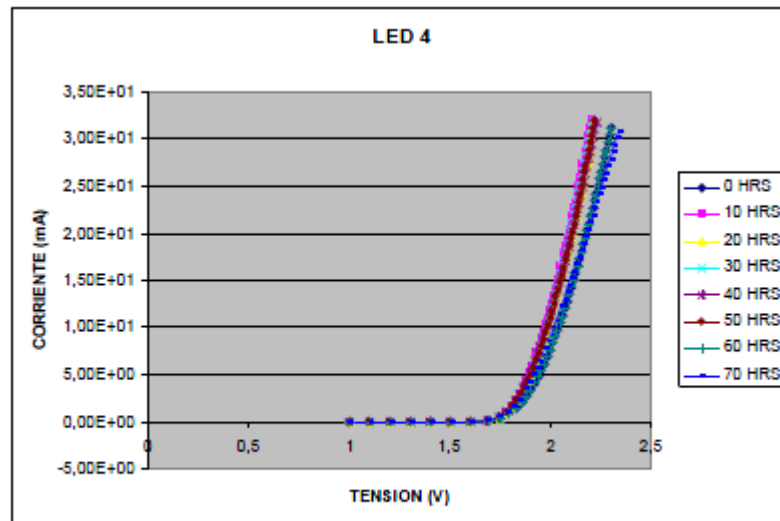


Este diodo presentó fallo a las 75 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una fuerte degradación de la curva I-V.

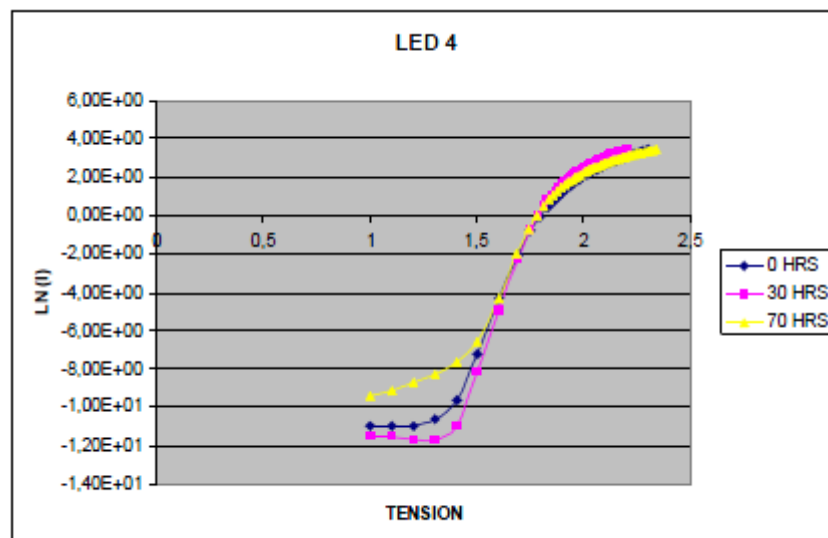


**Foto: Ánodo oxidado**

Desde este ángulo podemos ver también la oxidación del ánodo.

**LED 4**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 80 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Se aprecia una moderada degradación de la curva I-V.

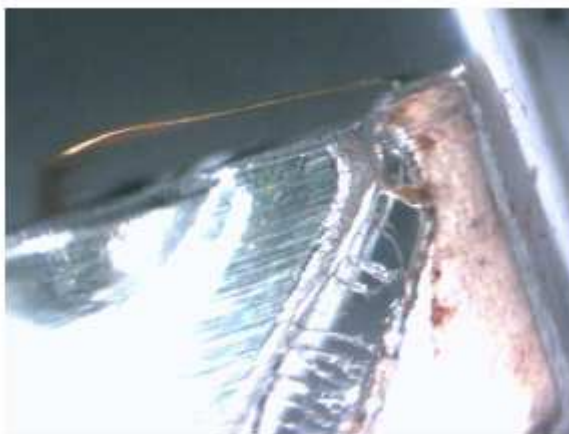
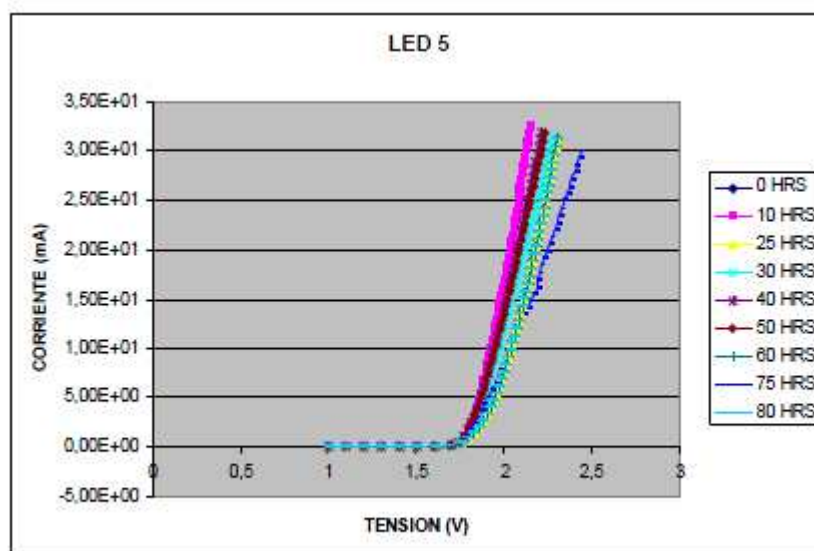


Foto: Anodo oxidado

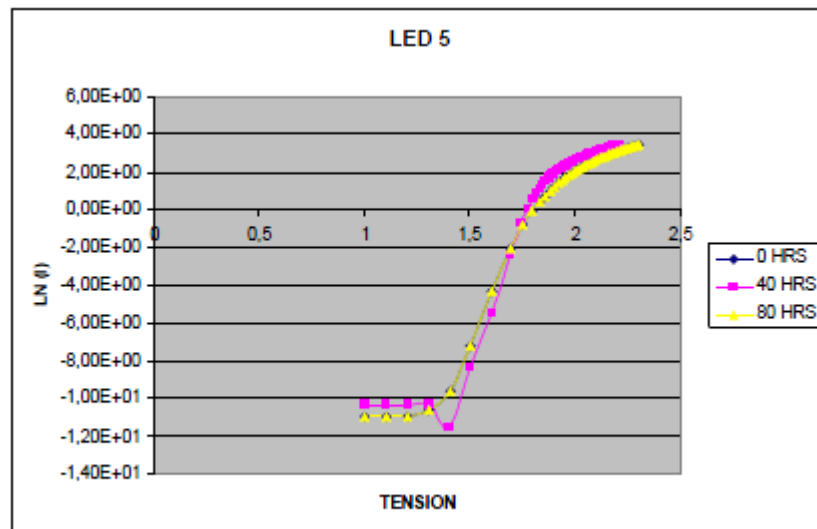
Vemos de nuevo el ánodo bastante oxidado.

### LED 5



Gráfica V-I



Gráfica degradación de  $R_s$ 

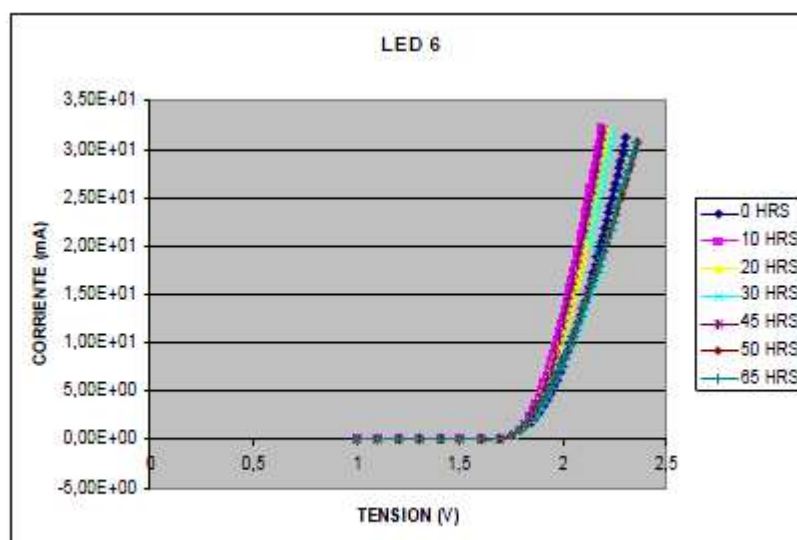
Este diodo presentó fallo a las 90 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V, sobre todo al final.



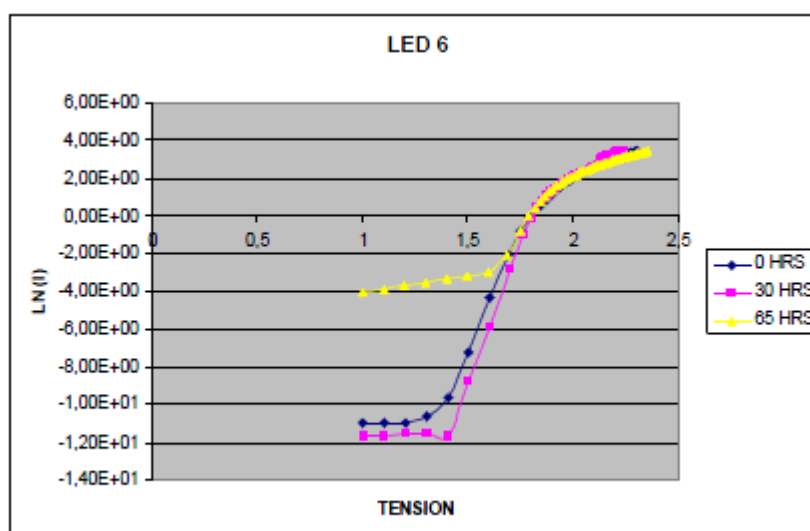
Foto: Ánodo oxidado

Vemos ligeramente la oxidación del ánodo, debido a que el encapsulado también ha sufrido degradación.

## LED 6



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

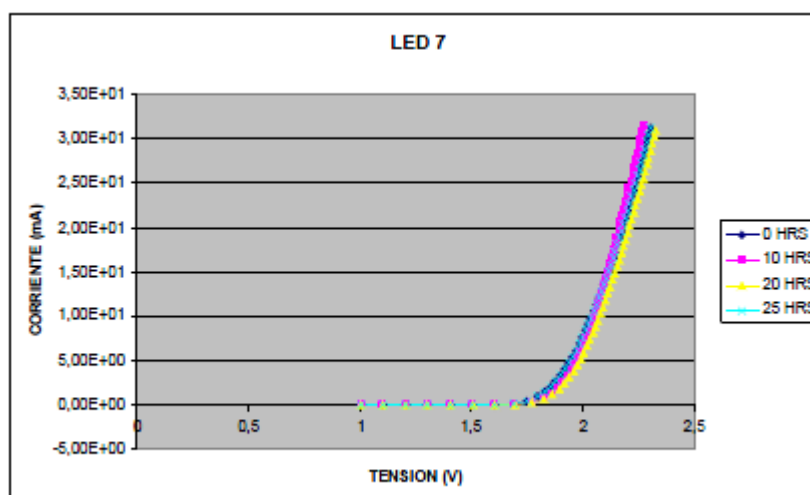
Este diodo presentó fallo a las 90 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 65 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación, así como una moderada degradación de la curva I-V.



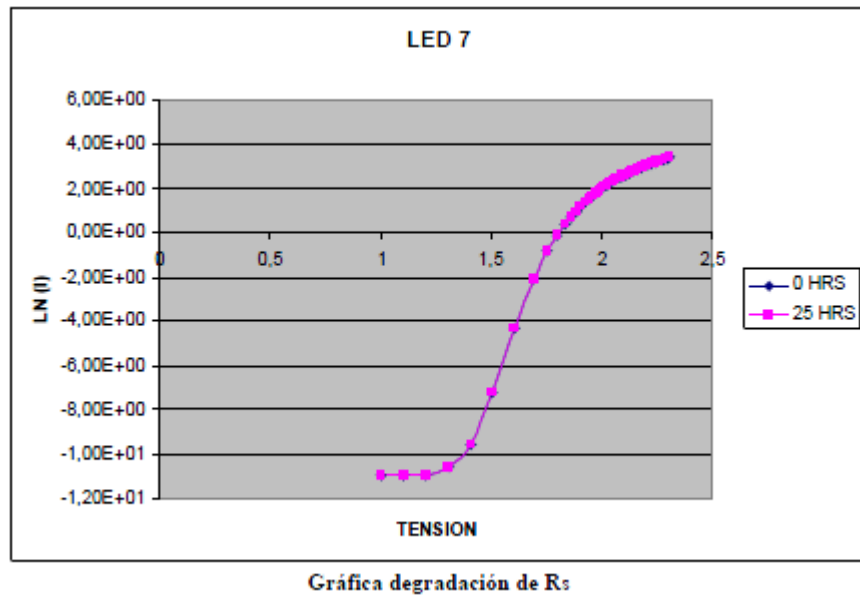
Foto: Ánodo oxidado

Observamos de nuevo la oxidación fuerte del ánodo.

### LED 7



Gráfica V-I



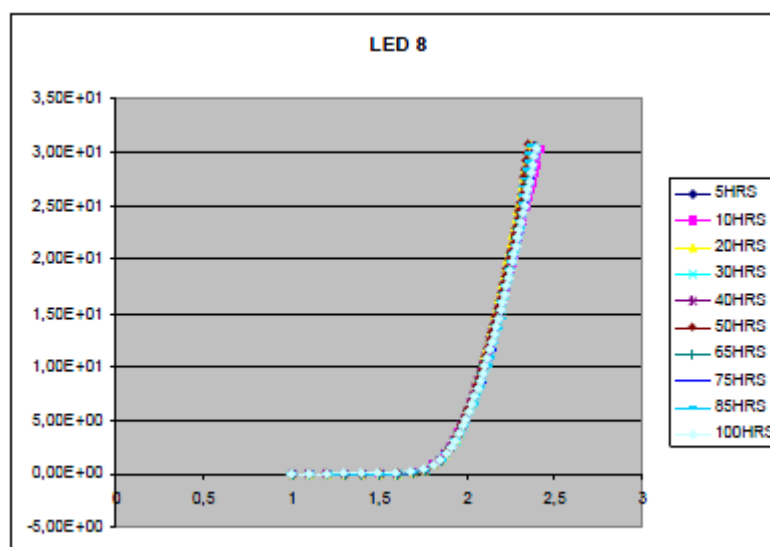
En este diodo se ha producido un fallo infantil por rotura de la pata del ánodo, como ya nos pasó anteriormente. El tiempo de duración hasta el fallo fue de 30 horas.



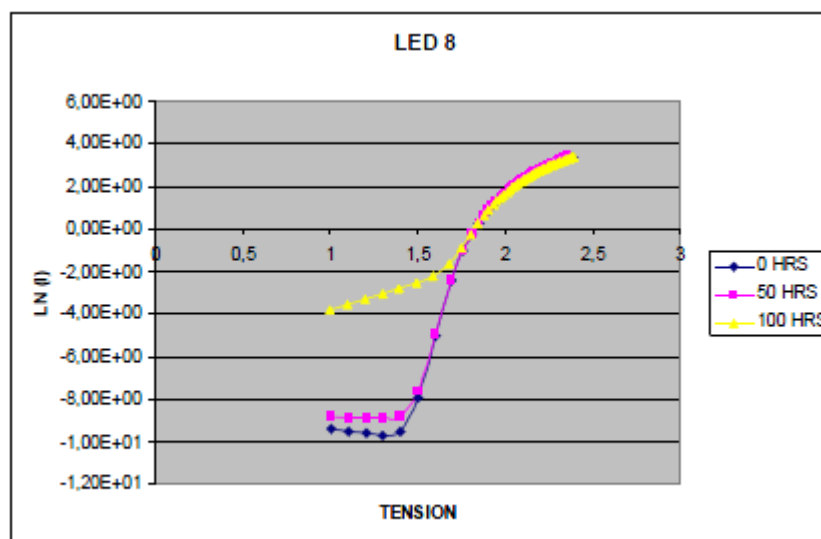
Foto: Patilla rota

Se observa la patilla del ánodo dañada

## LED 8



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 95 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

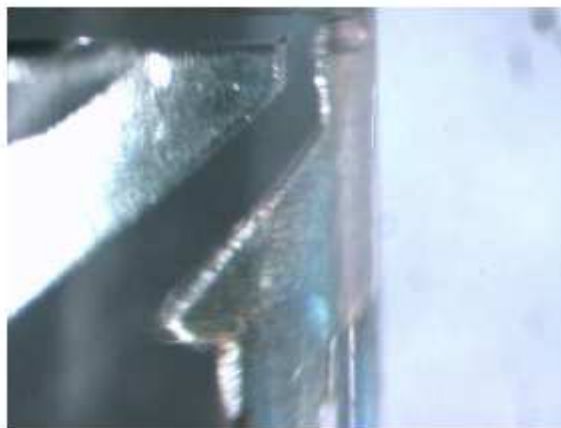
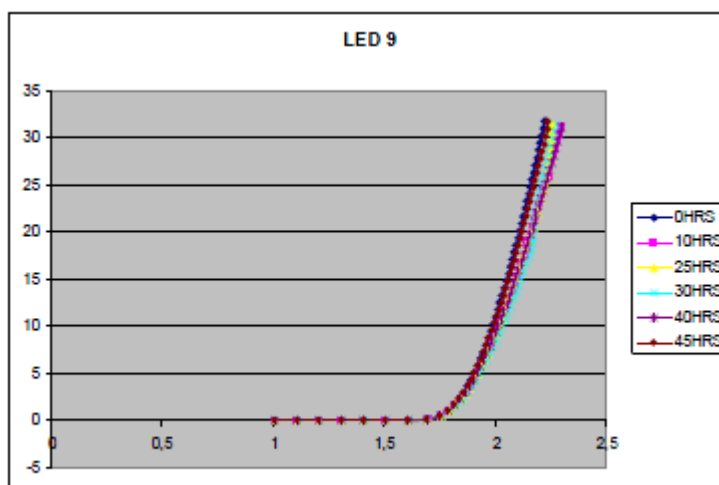


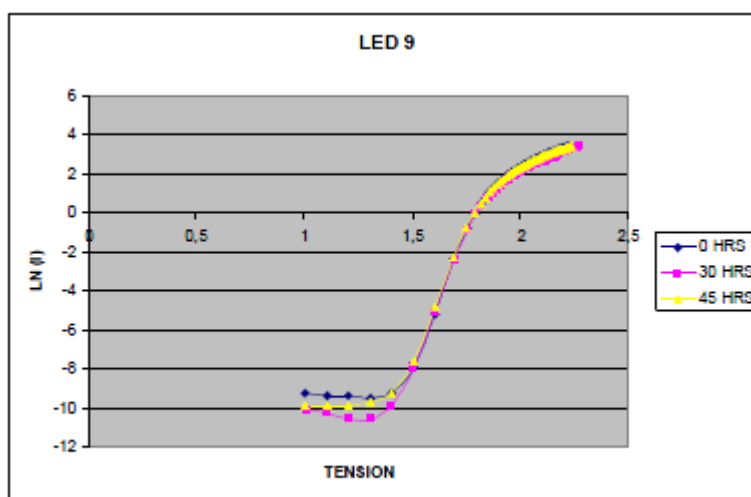
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 9

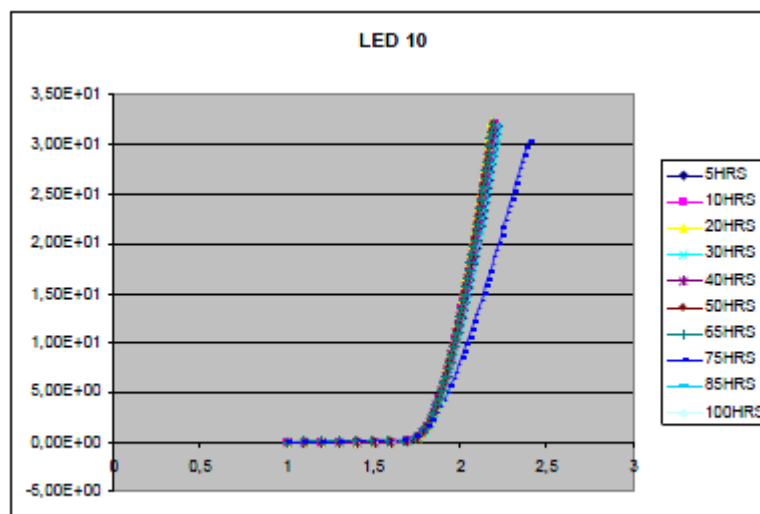


Gráfica V-I

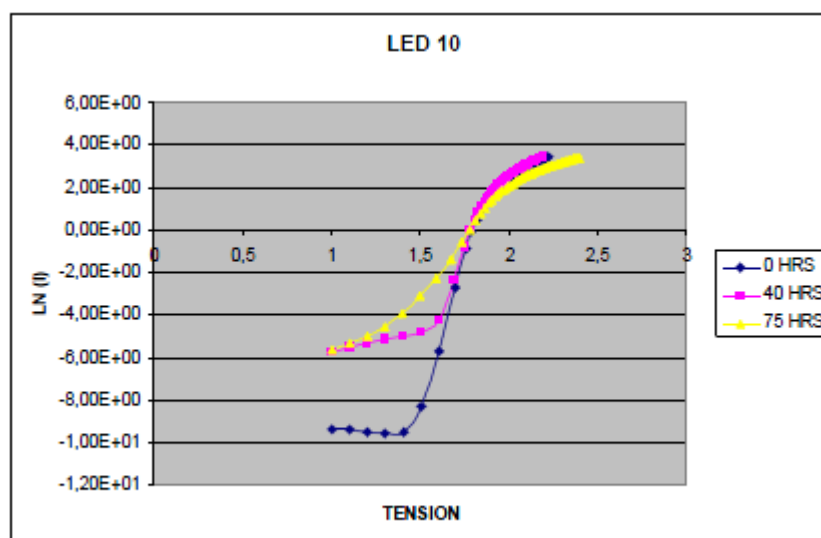


**Foto: Ánodo oxidado**

Se ve bastante oxidación del ánodo desde este plano.

**LED 10**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 80 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una degradación moderada a fuerte de la curva I-V.



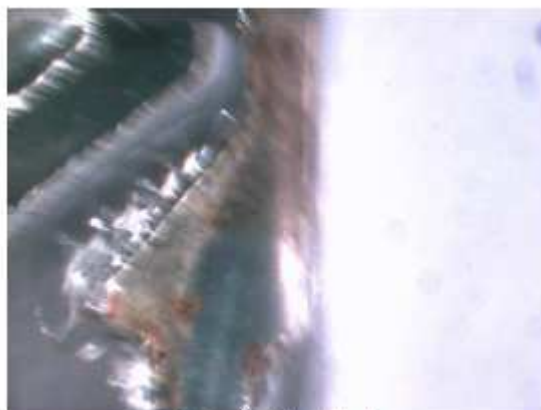
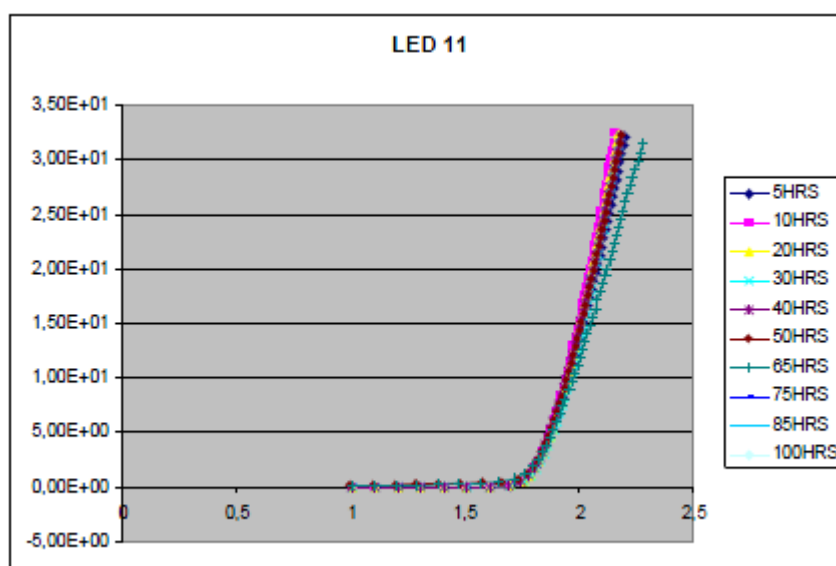


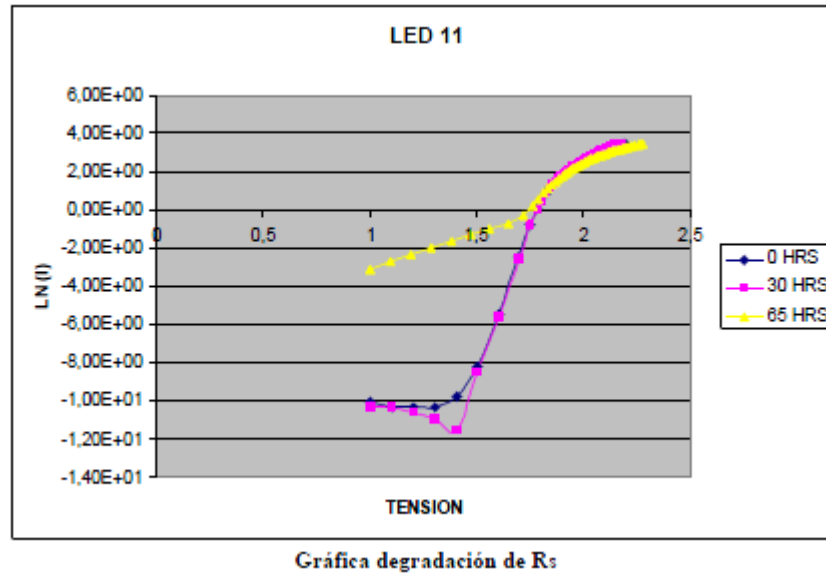
Foto: Ánodo oxidado

Aunque no se distingue demasiado bien, el ánodo está bastante oxidado en este caso también.

### LED 11



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 70 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 30 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

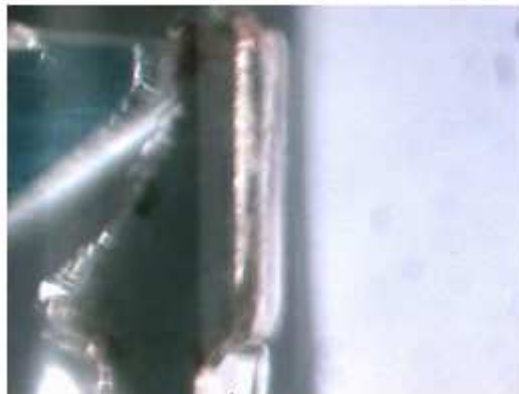
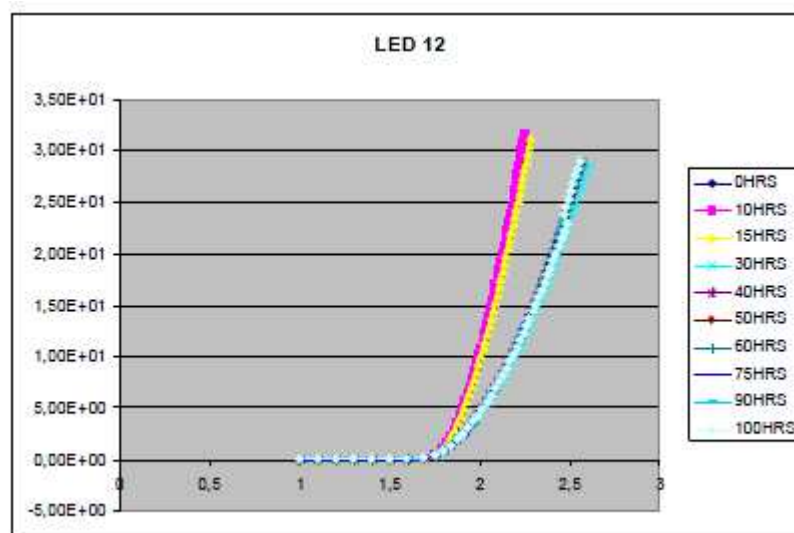


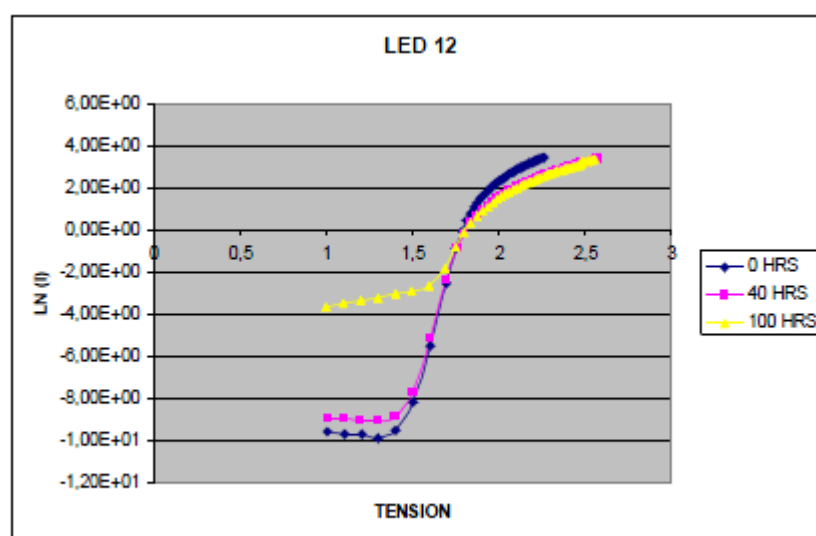
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 12



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

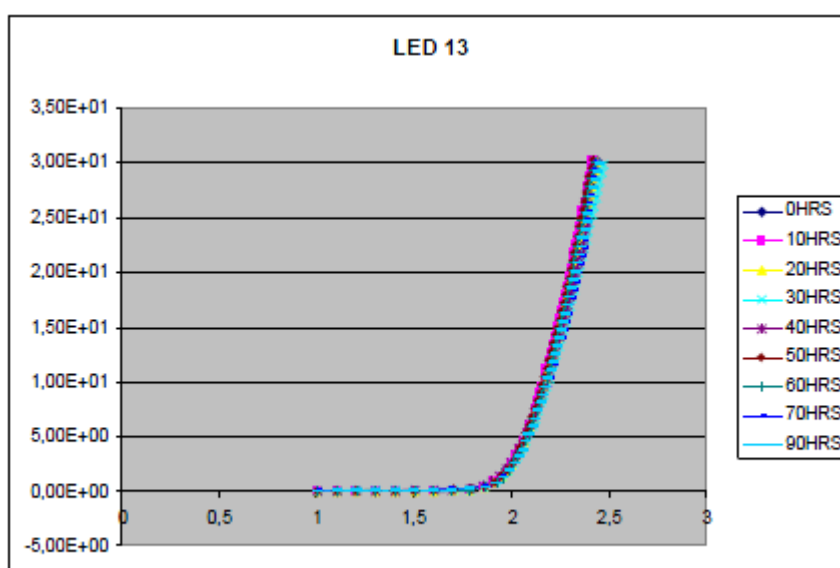
Este diodo no presentó fallo durante las 100 horas de ensayo, y alcanzó su máximo de potencia a las 65 horas. Se produce un aumento apreciable de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



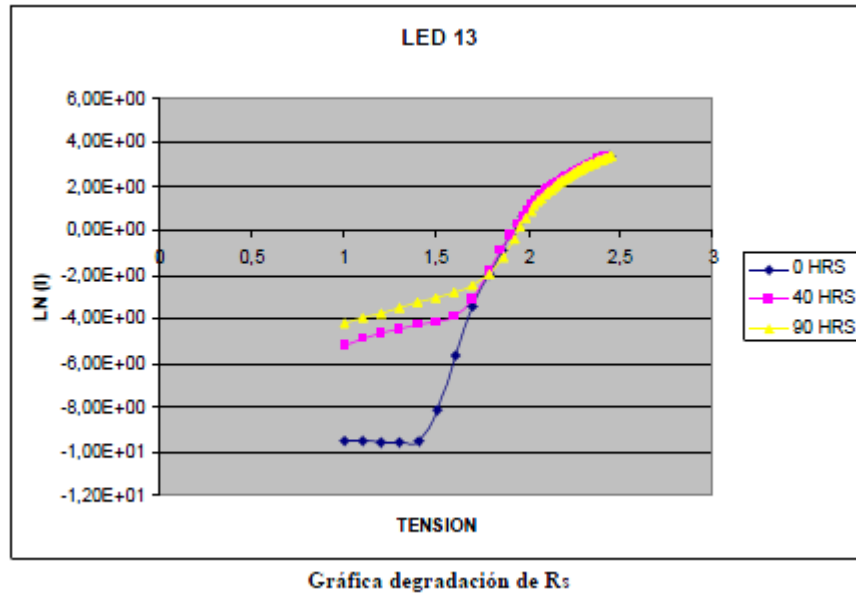
Foto: Ánodo con apenas óxido

Se puede ver el ánodo algo oxidado, pero considerablemente menos que el resto.

### LED 13



Gráfica V-I



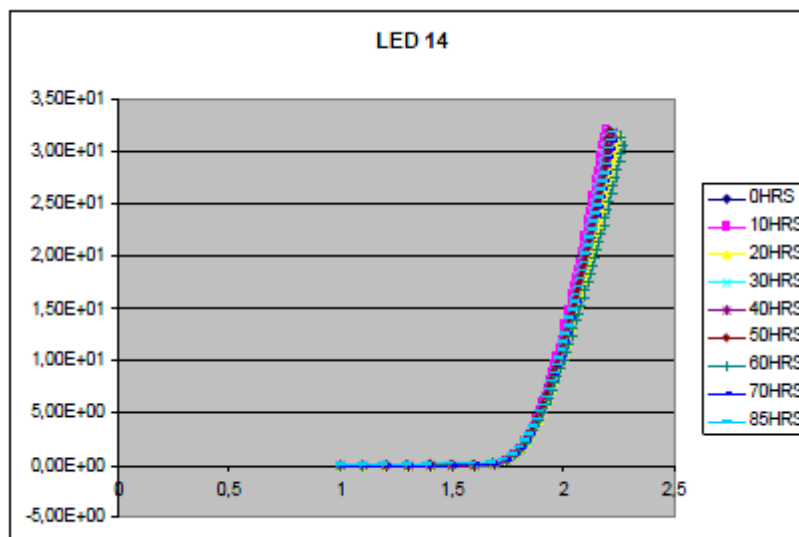
Este diodo presentó fallo a las 90 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe muy poca degradación de la curva I-V.



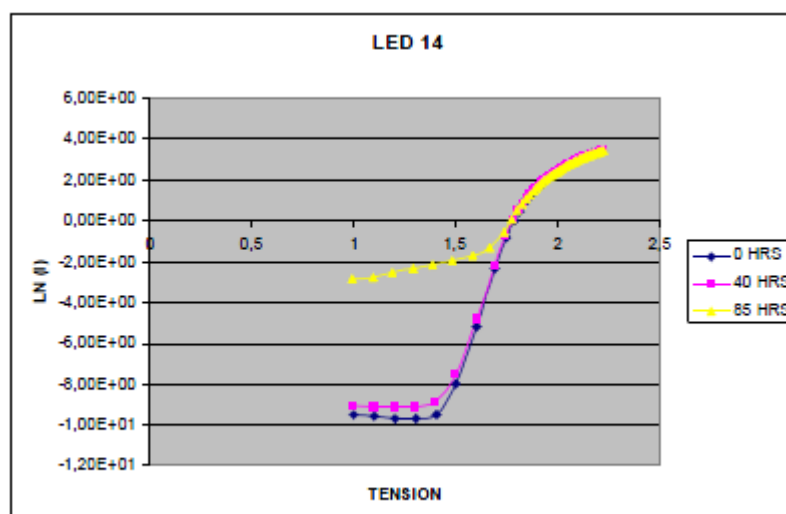
Foto: Ánodo oxidado

Se observa el ánodo oxidado.

## LED 14



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

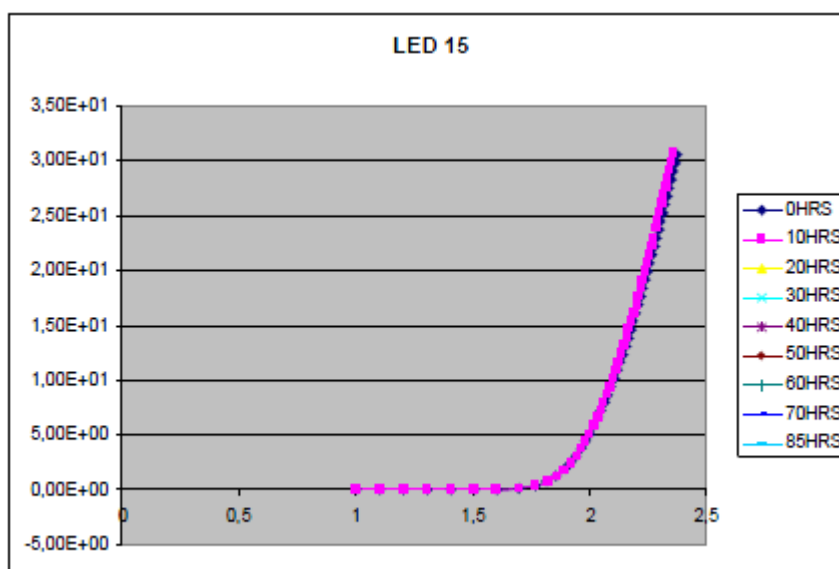
Este diodo presentó fallo a las 85 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 40 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.



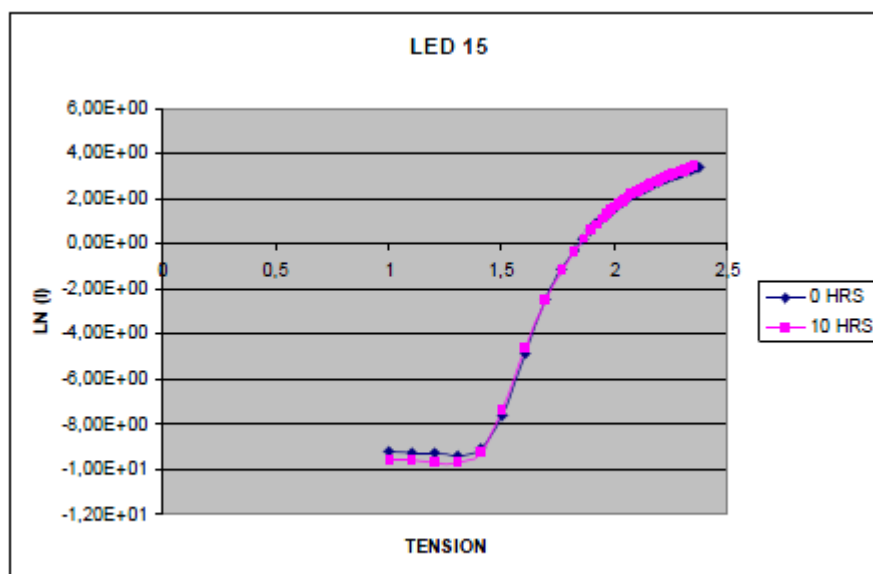
Foto: Ánodo oxidado

No se observa tanta oxidación a en la foto. En el examen visual se comprueba mejor la oxidación del ánodo.

### LED 15



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo infantil por rotura de la pata del ánodo a las 15 horas.

No hay cambios apreciables en las gráficas.



Foto: Patilla rota

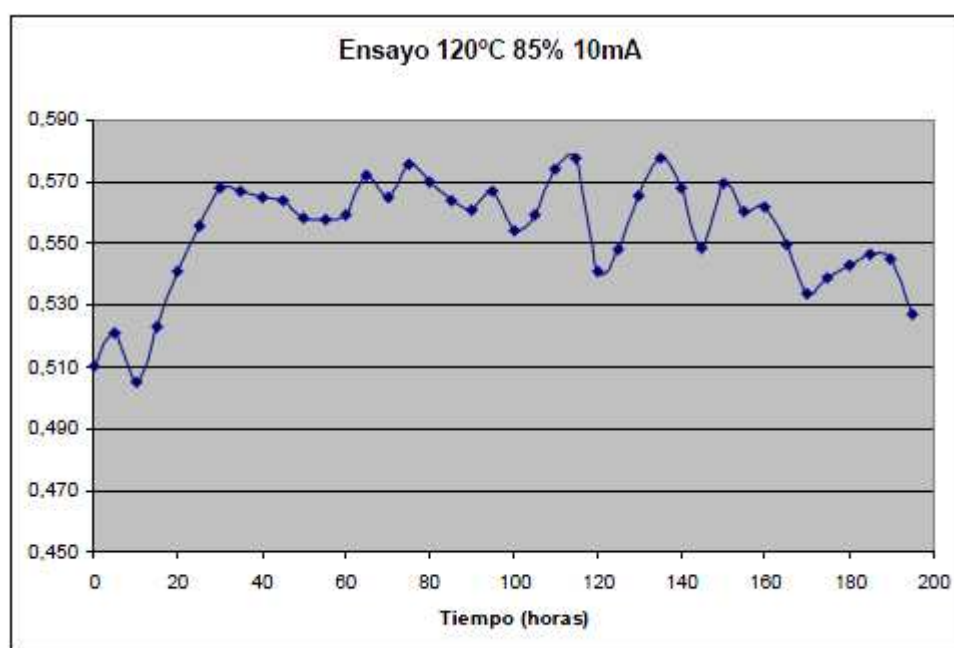
Podemos ver la foto de la pata del ánodo rota.



### 5.3.3 ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA

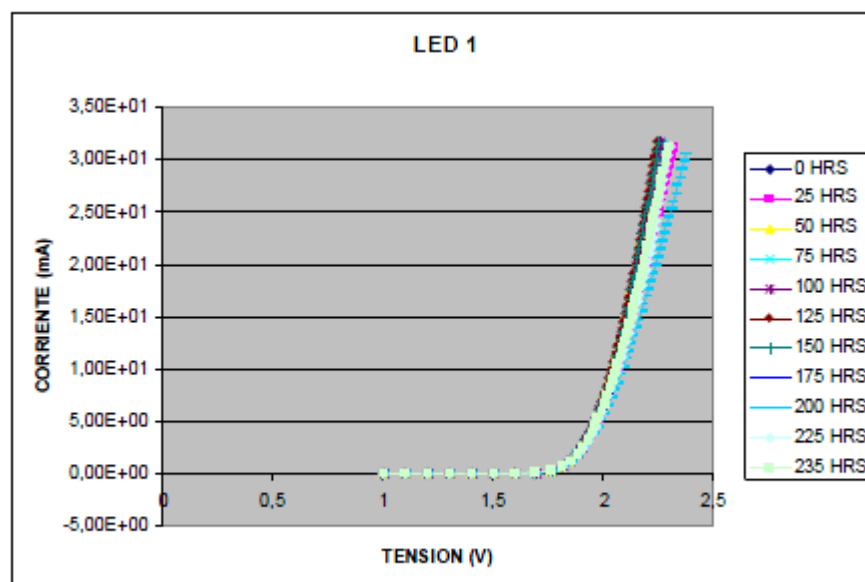
En este ensayo la cosa cambió bastante. La temperatura era mucho menos, aunque aumentamos a niveles del primer ensayo la humedad relativa. En este caso, la duración total del ensayo fue de 275 horas. Además, no se dieron casos de fallos infantiles y dos de los LED no llegaron a presentar fallo.

Aquí mostramos de nuevo una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 195 horas debido a que los resultados a partir de las 200 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.

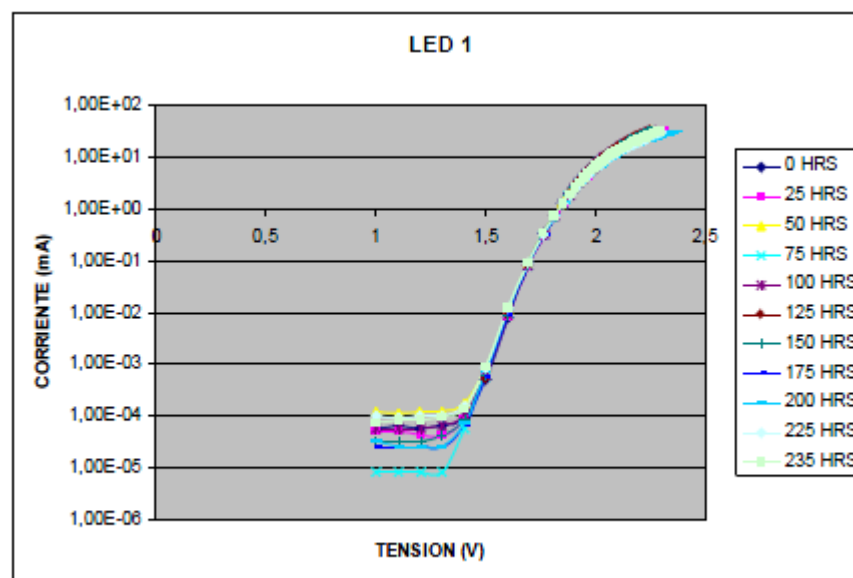


Gráfica de la potencia media del ensayo

## LED 1



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$

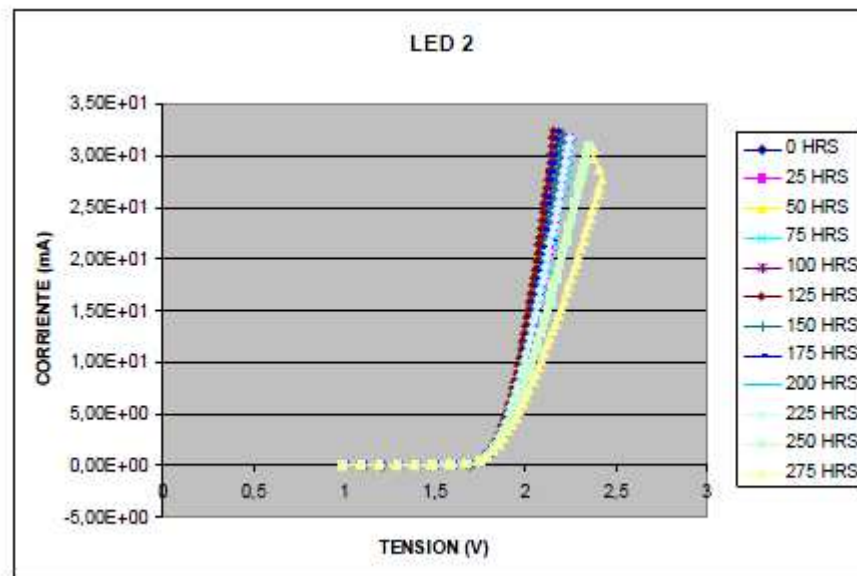
Este diodo presentó fallo a las 235 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 160 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una ligera a moderada degradación de la curva I-V.



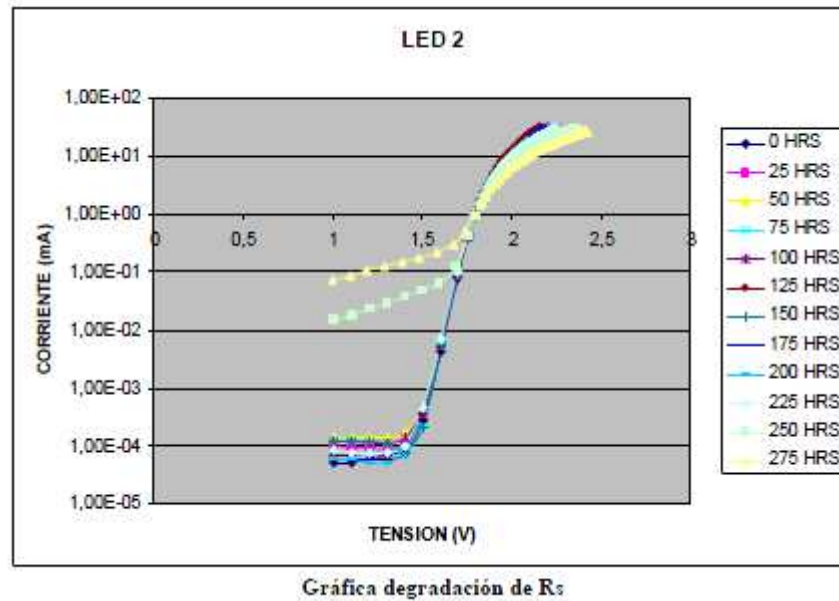
Foto: Ánodo oxidado

Podemos ver de forma clara la oxidación del ánodo.

## LED 2



Gráfica V-I



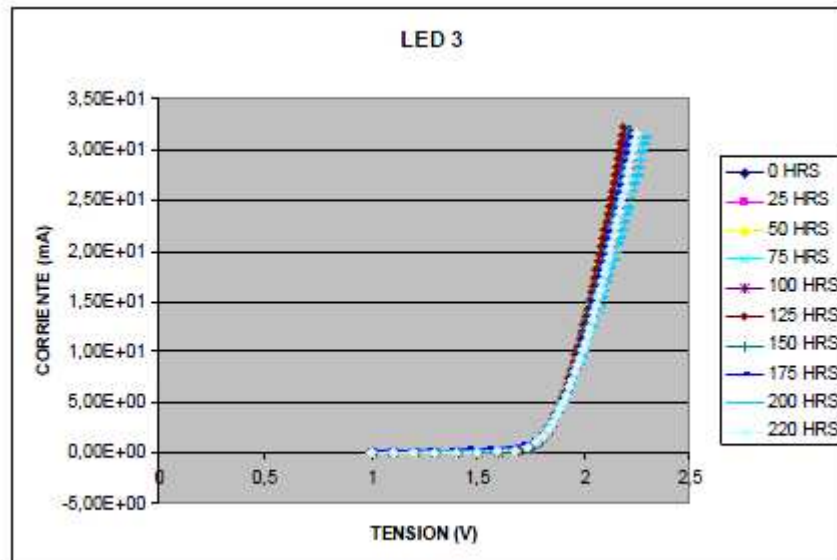
Este diodo no presentó fallo en las 275 horas que duró el ensayo y alcanzó su máximo de potencia a las 135 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



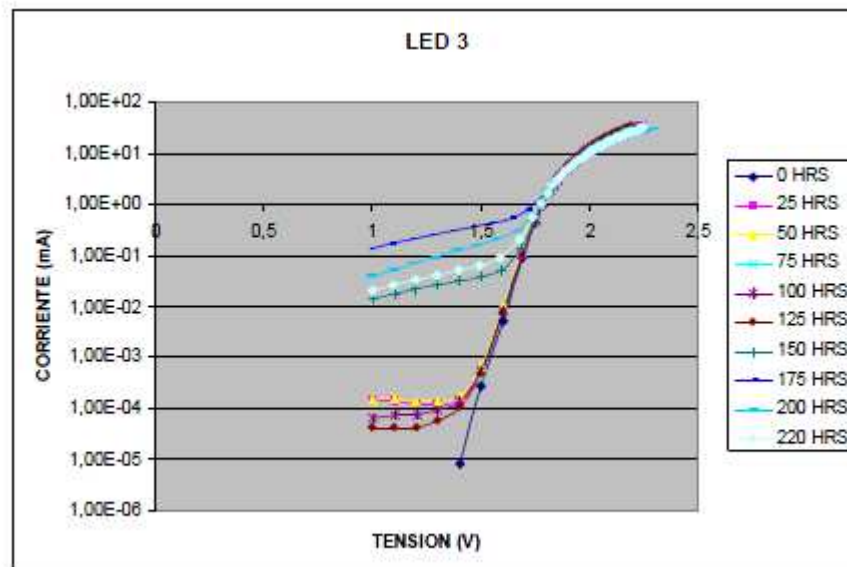
Foto: Ánodo sin oxidación

Como vemos, es de los pocos diodos que no presentan óxido en el ánodo de forma visible.

## LED 3



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

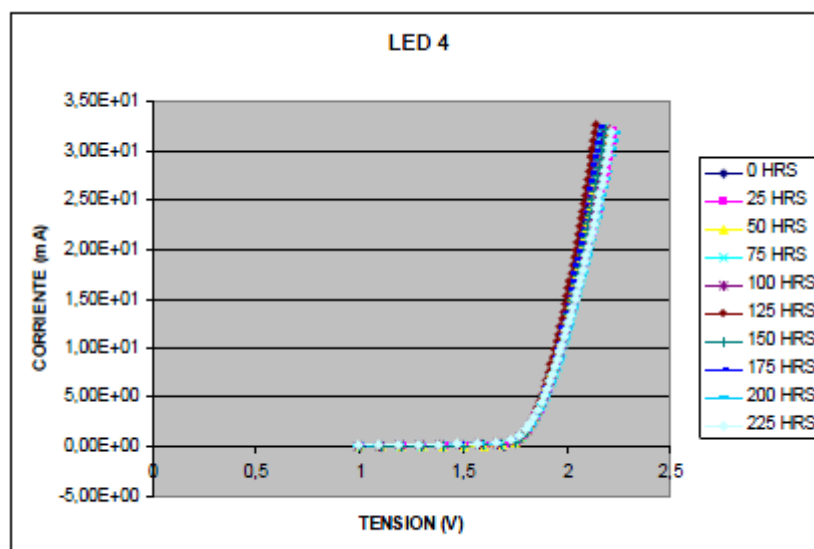
Este diodo presentó fallo a las 220 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 35 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. No hay apenas degradación de la curva I-V.



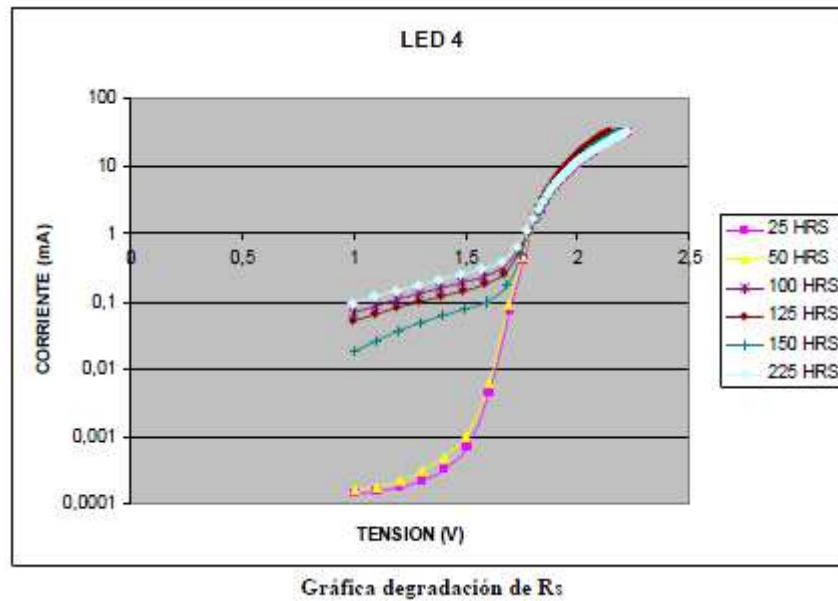
Foto: Ánodo oxidado

Observamos óxido en el ánodo, aunque en menor medida que otros diodos.

#### LED 4



Gráfica V-I



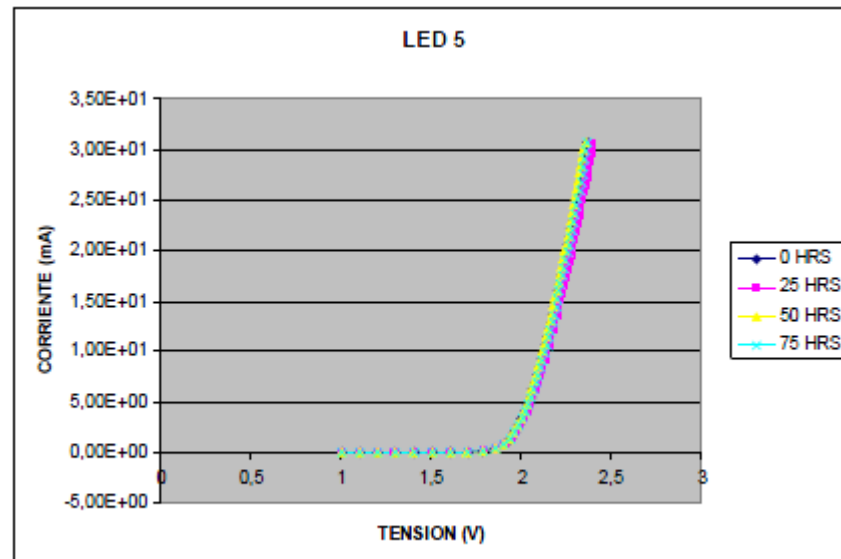
Este diodo presentó fallo a las 235 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 30 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.



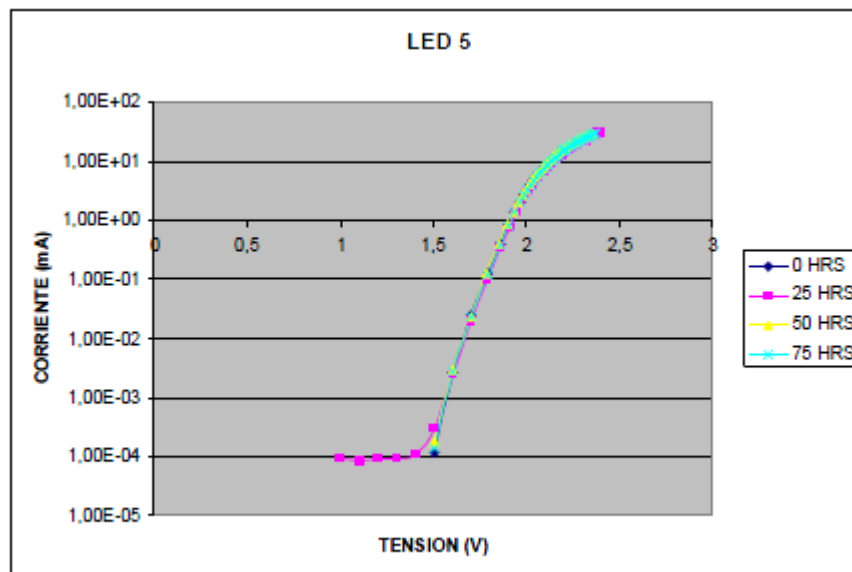
**Foto: Ánodo oxidado**

En la foto vemos bastante oxidación.

## LED 5



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 75 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 65 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una pequeña variación de la corriente de saturación. Existe muy escasa degradación de la curva I-V.



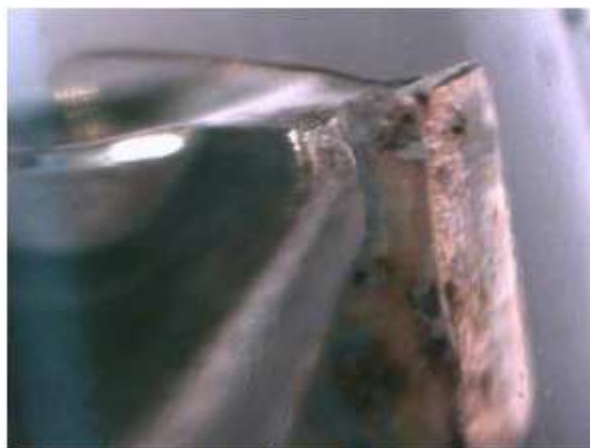
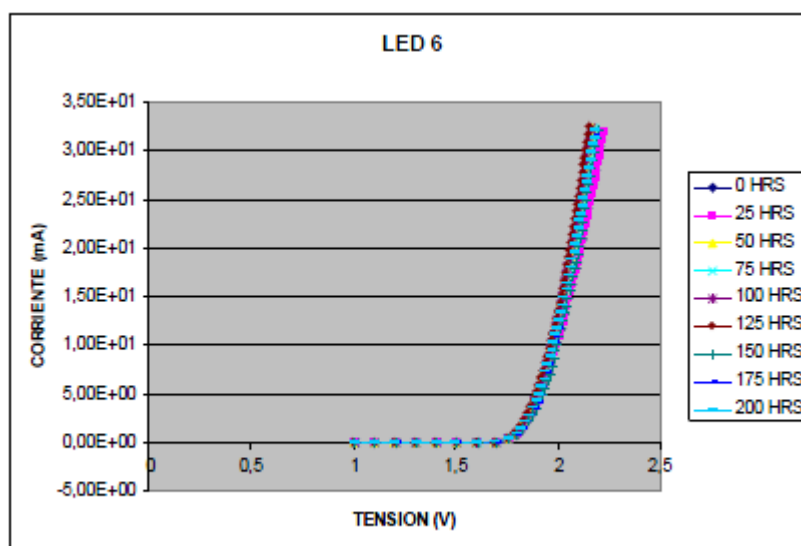


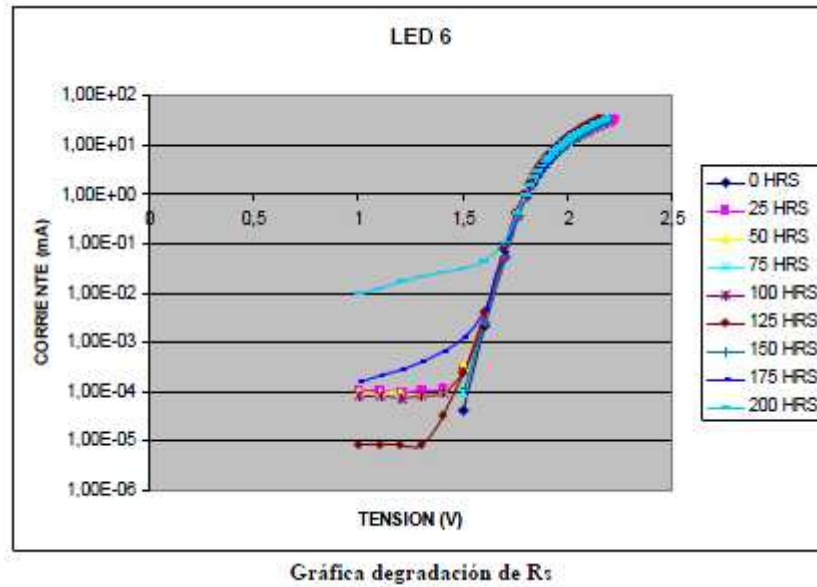
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo muy oxidado.

### LED 6



Gráfica V-I



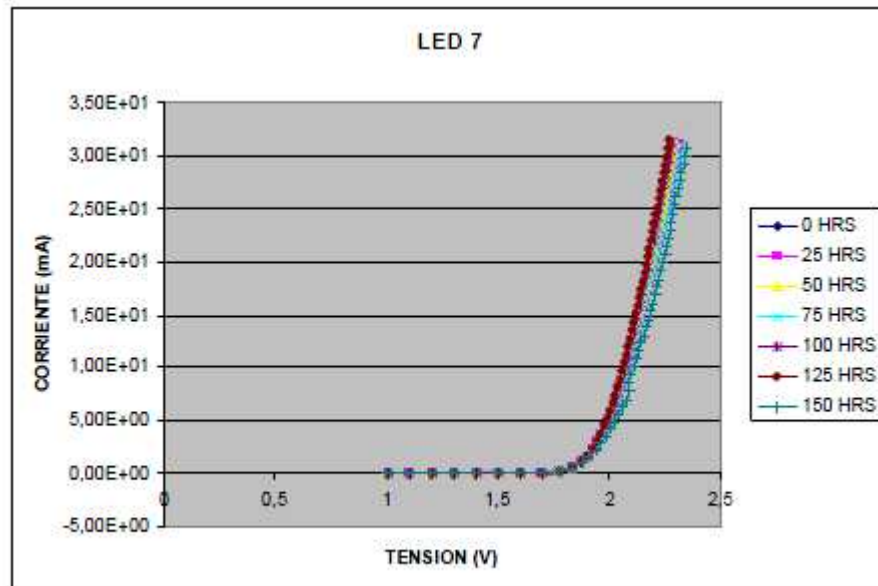
Este diodo presentó fallo a las 215 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 50 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una ligera degradación de la curva I-V.



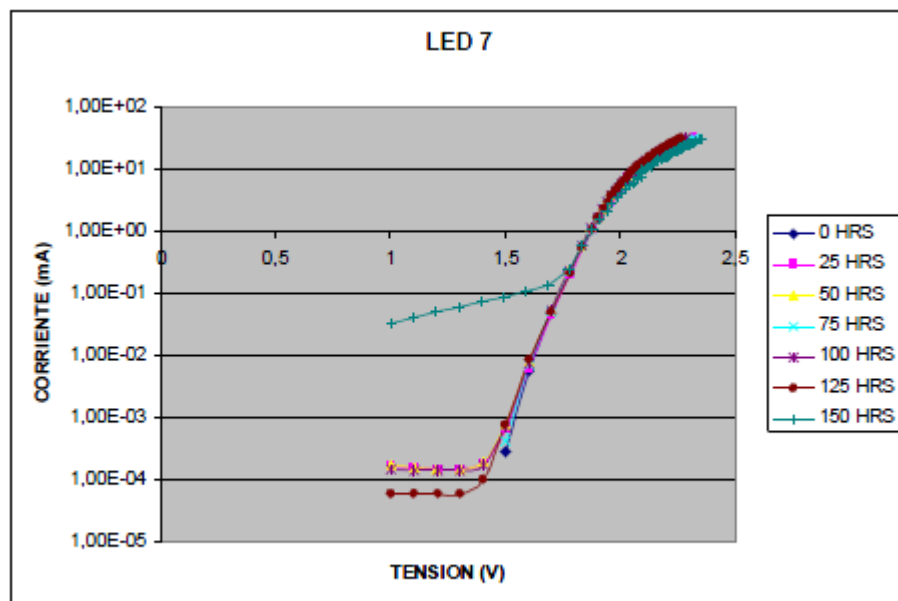
**Foto: Ánodo oxidado**

Ánodo oxidado, aunque algo menos que el resto.

## LED 7



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

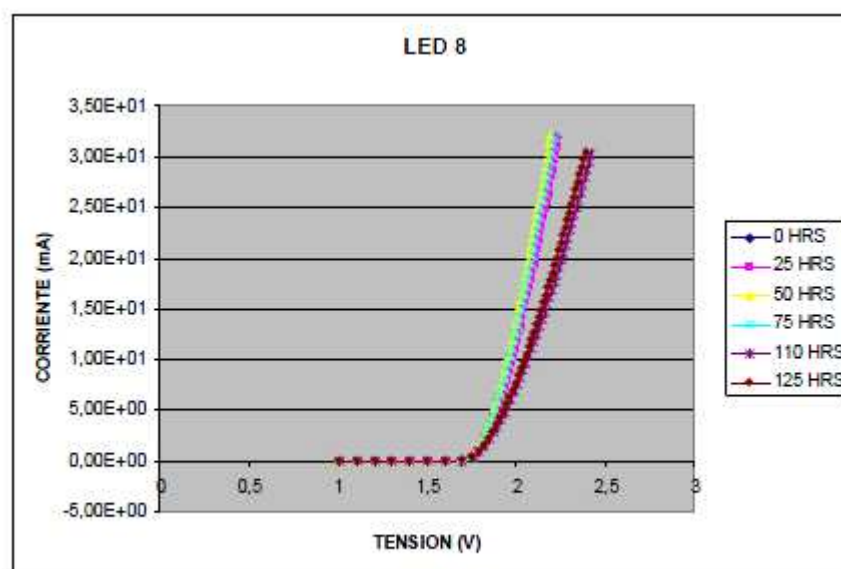
Este diodo presentó fallo a las 230 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 120 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una ligera degradación de la curva I-V.



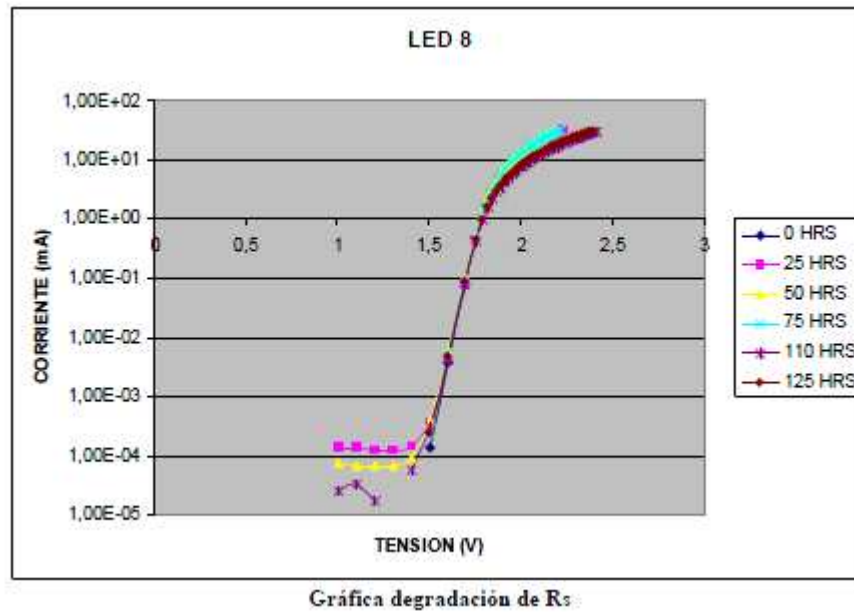
Foto: Ánodo oxidado

Se puede ver el ánodo oxidado, de nuevo.

## LED 8



Gráfica V-I



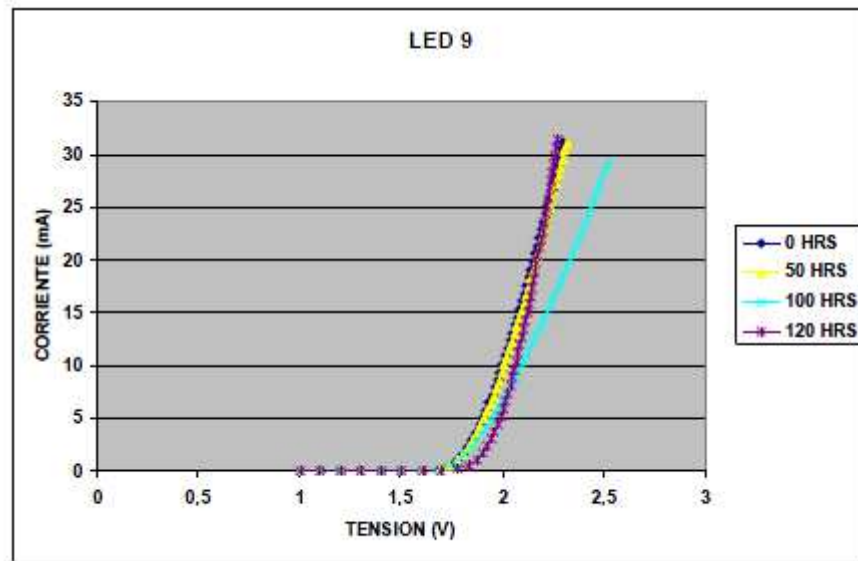
Este diodo presentó fallo a las 140 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 135 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada a fuerte degradación de la curva I-V.



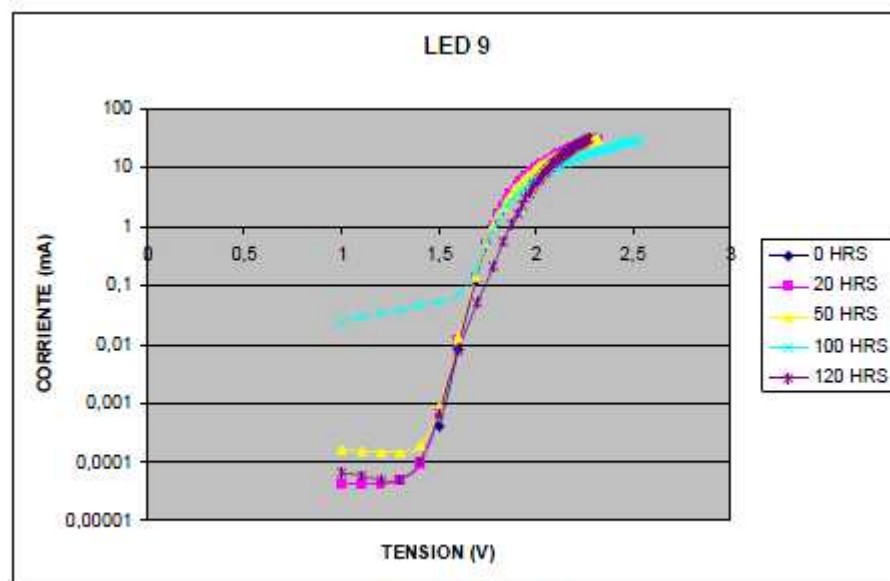
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 9



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

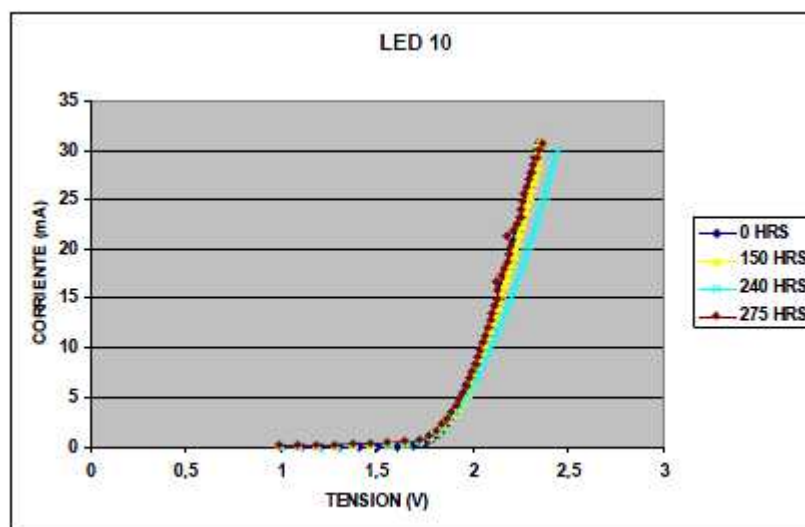
Este diodo presentó fallo a las 120 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 115 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V, sobre todo al final.



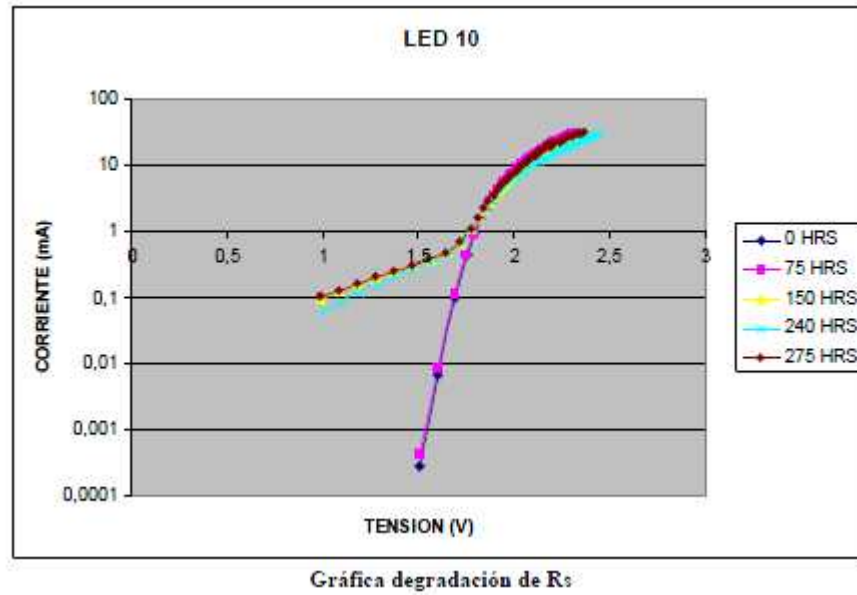
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo con bastante oxidación.

## LED 10



Gráfica V-I



Este diodo no presentó fallo durante las 275 horas del ensayo y alcanzó su máximo de potencia a las 80 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación fuerte de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

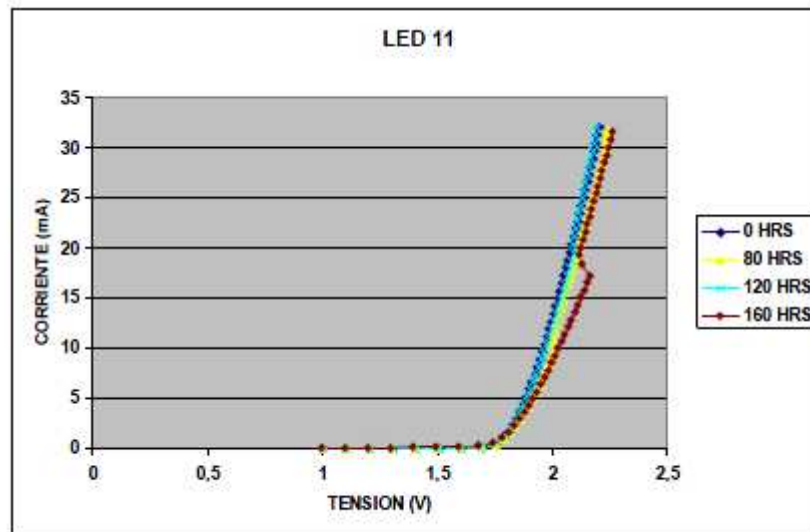


Foto: Ánodo con poco óxido

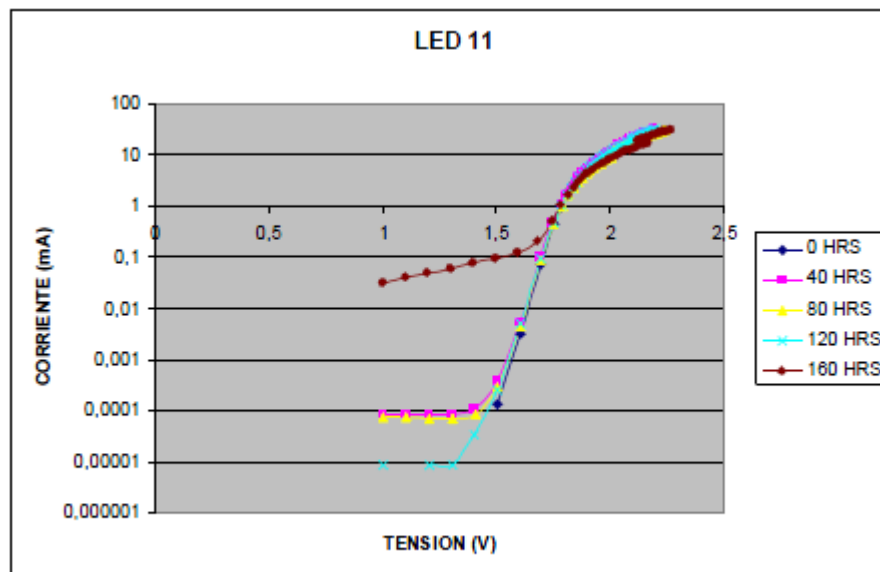
No se observa mucha oxidación.



## LED 11



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 160 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 150 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una ligera degradación de la curva I-V.

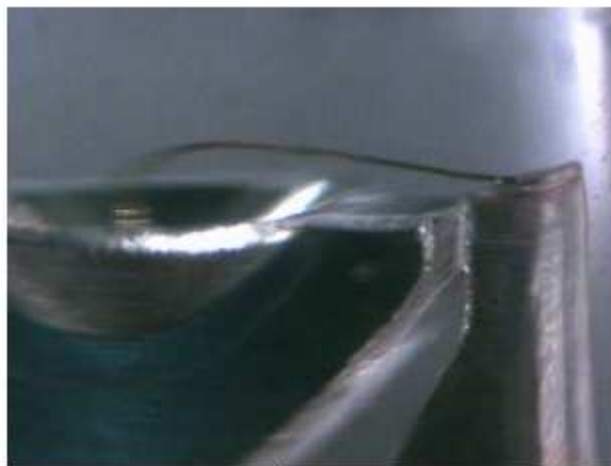
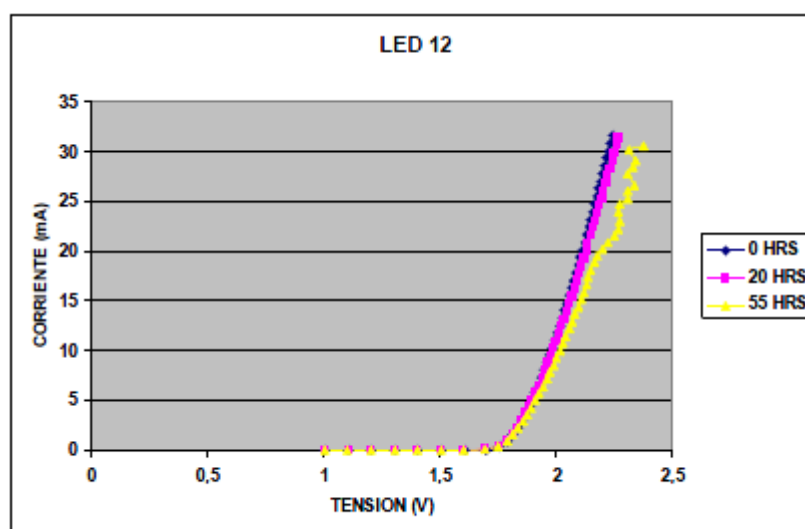


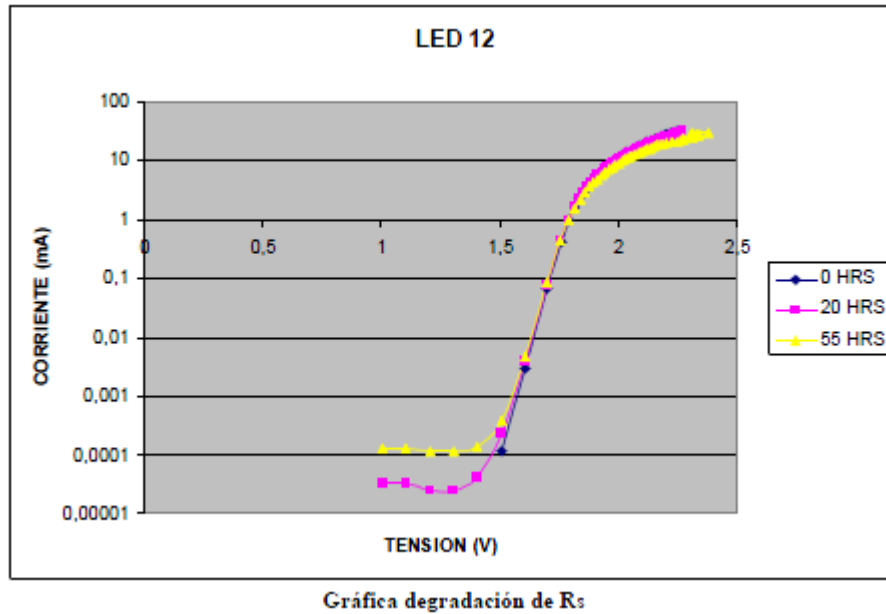
Foto: Ánodo oxidado

Vemos el ánodo oxidado, aunque la foto está un poco oscura.

## LED 12



Gráfica V-I



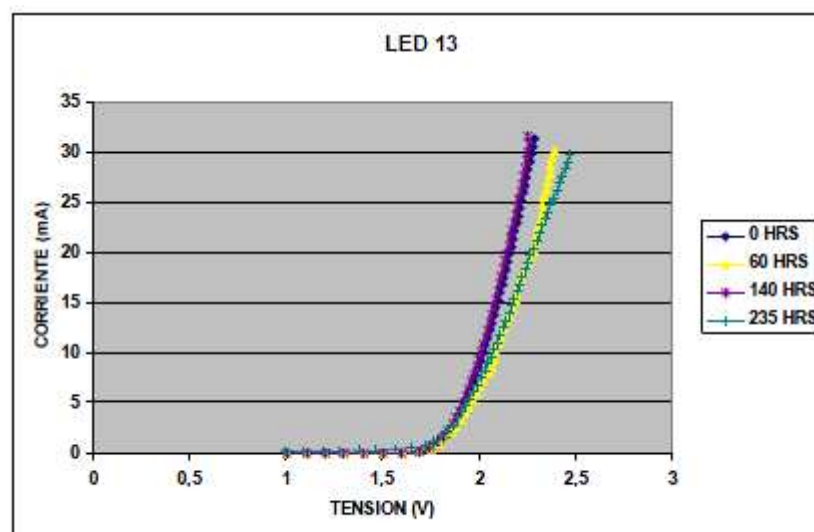
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una extraña degradación de la curva I-V, puede que por algún fallo en la medida.



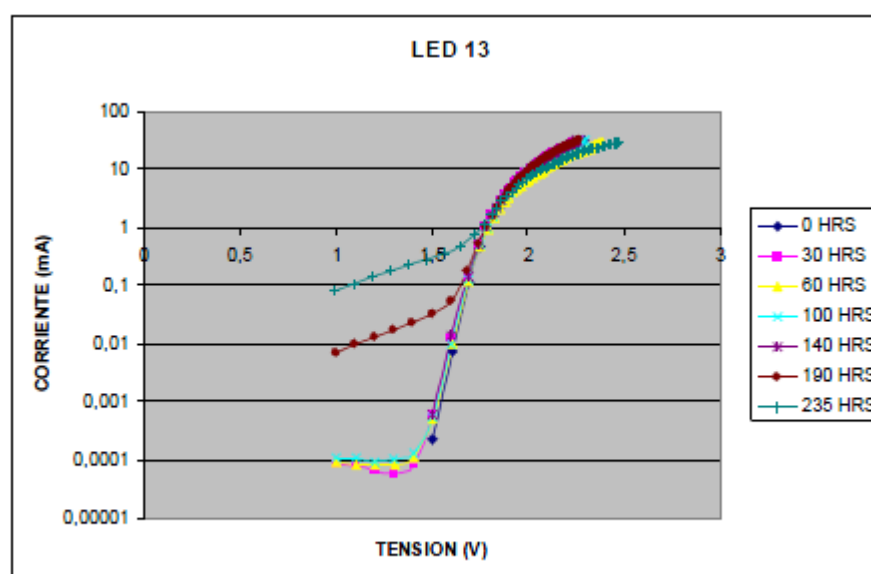
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo bastante oxidado.

## LED 13



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

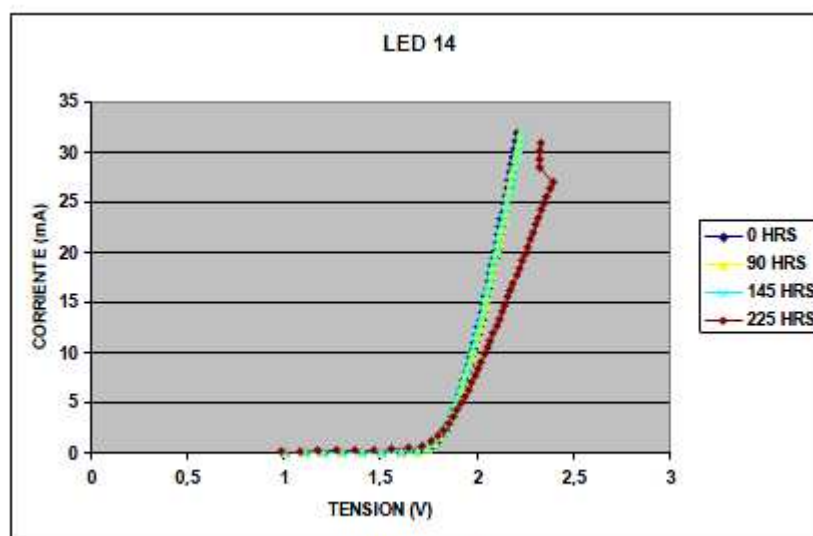
Este diodo presentó fallo a las 235 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 60 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una fuerte degradación de la curva I-V.



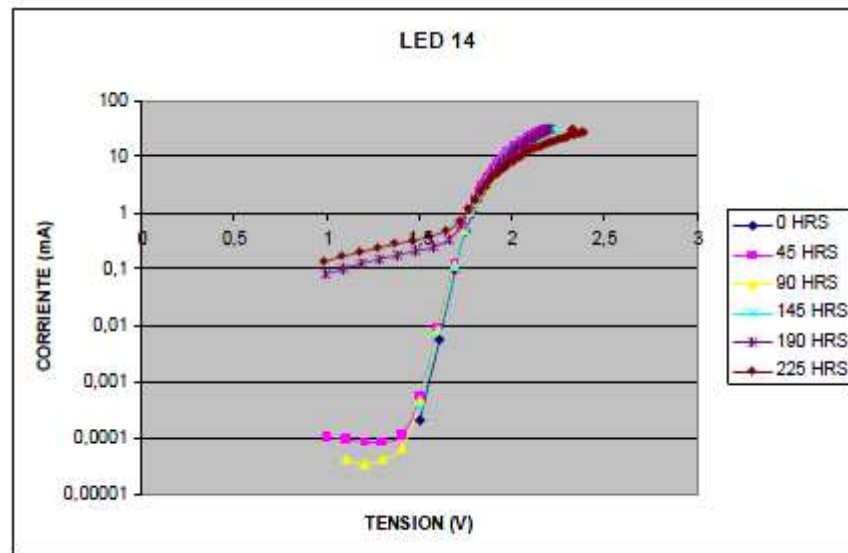
Foto: Anodo oxidado

Observamos la oxidación notable en la foto.

#### LED 14



Gráfica V-I



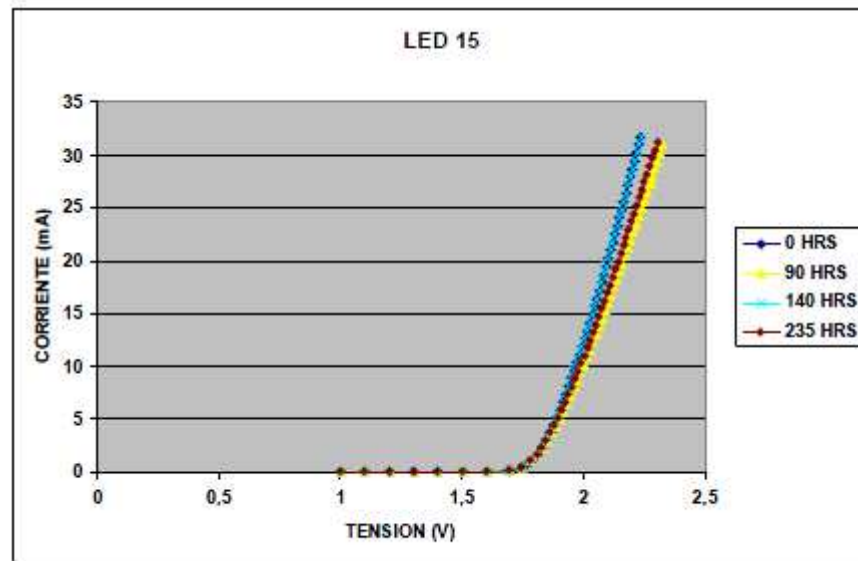
Este diodo presentó fallo a las 225 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 45 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V a final.



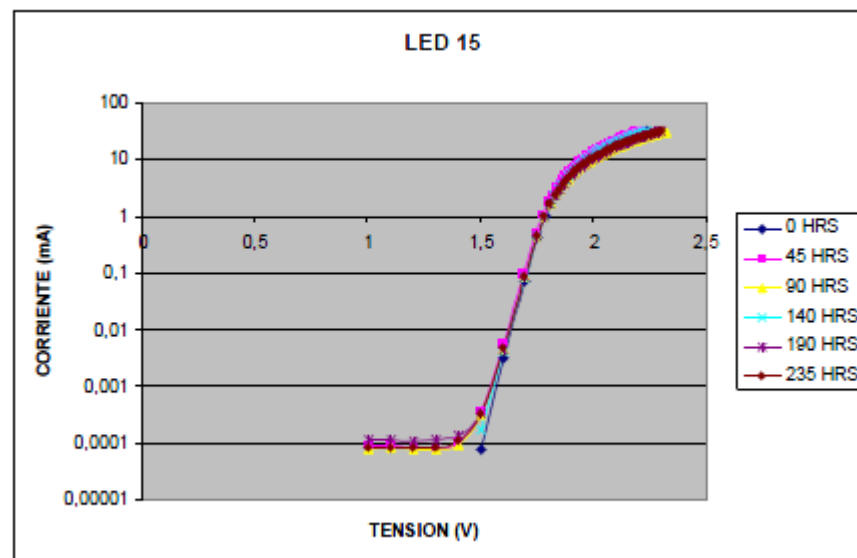
Foto: Ánodo oxidado

El ánodo presenta bastante oxidación.

## LED 15



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 240 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 135 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

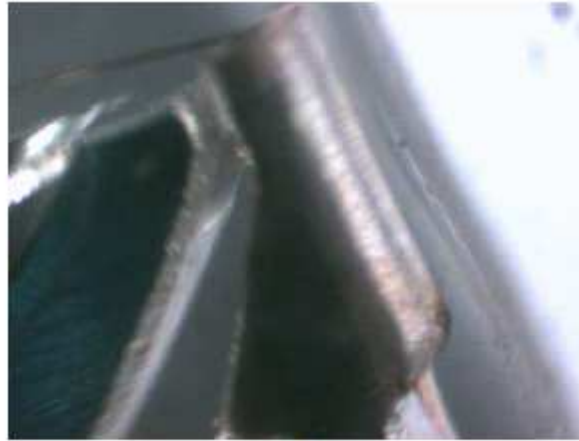


Foto: Anodo oxidado

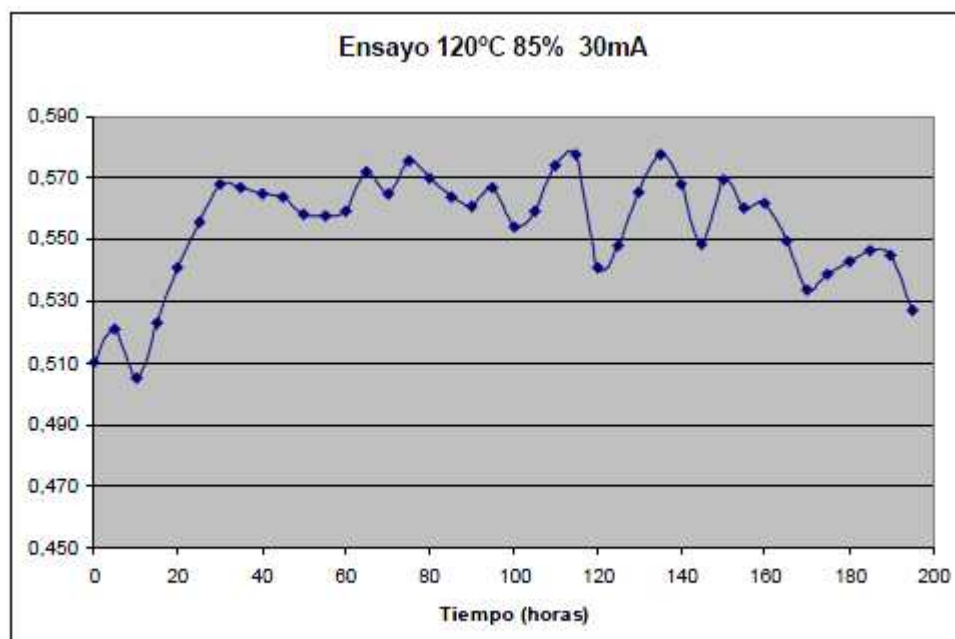
Se observa la oxidación del ánodo.

#### 5.3.4 ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA

En este ensayo aumentamos la intensidad de la corriente a 30 mA y mantenemos los demás valores con la finalidad de poder observar de primera mano la repercusión en los resultados de este aumento de corriente. Un dato curioso es que uno de los LED presentó ruptura en el encapsulado, hecho aislado y no fácil de ver, con lo cual no se ha tenido en consideración para los cálculos de fiabilidad. La duración total es de 240 horas, aunque uno de los LED no llegó a fallar de forma catastrófica, al igual que en el ensayo anterior.

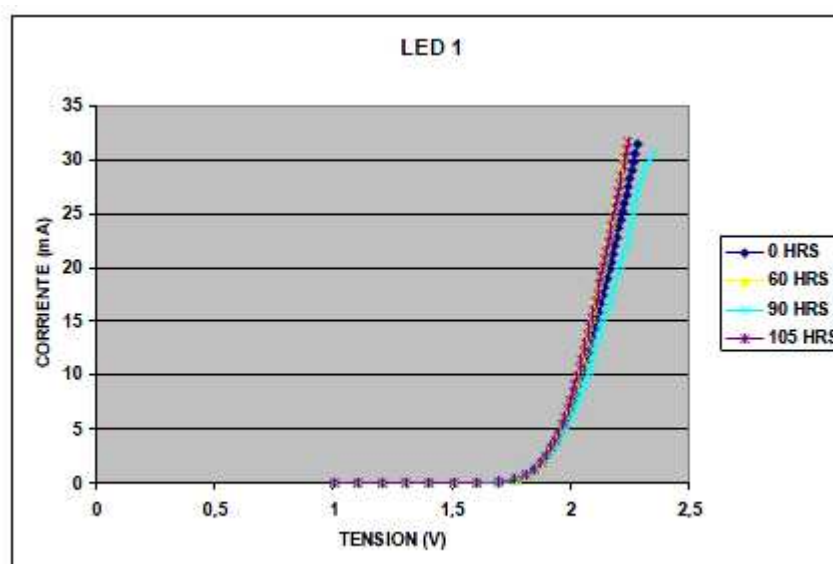
Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 195 horas debido a que los resultados a partir de las 200 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



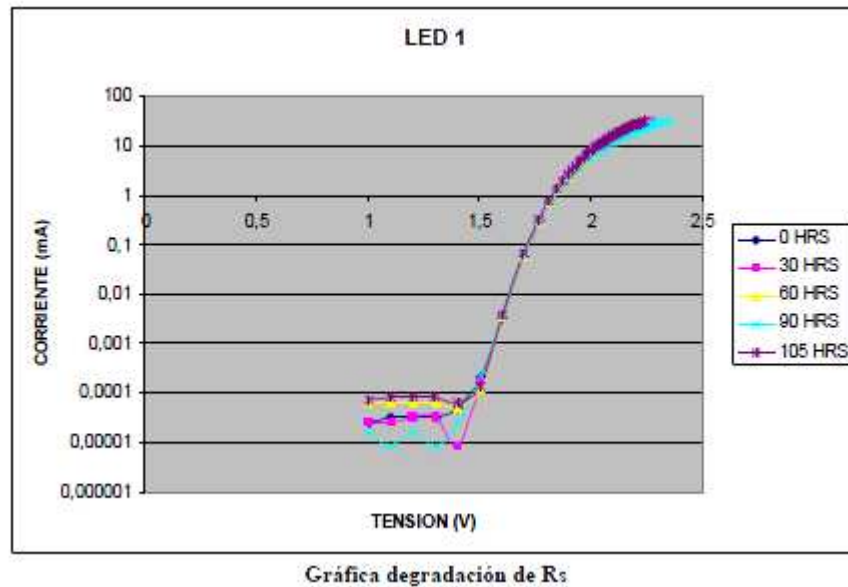


Gráfica de la potencia media del ensayo

## LED 1



Gráfica V-I



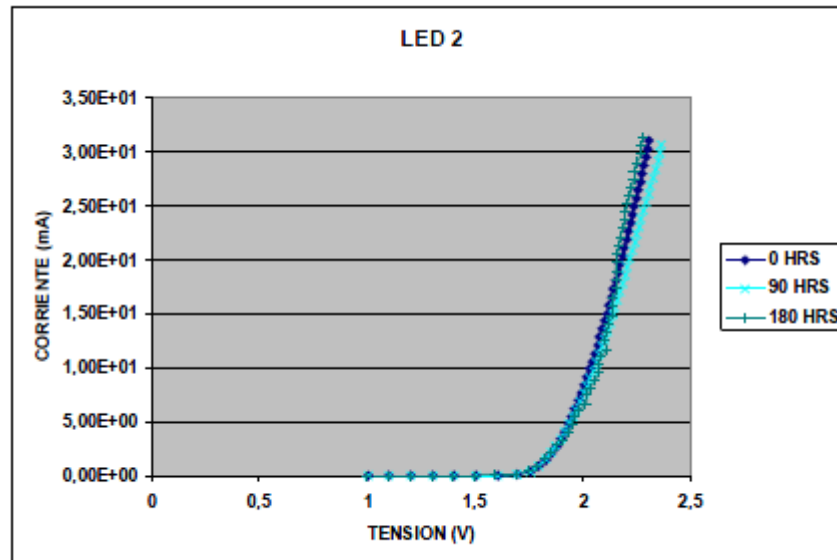
Este diodo presentó fallo a las 105 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las mismas 105 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



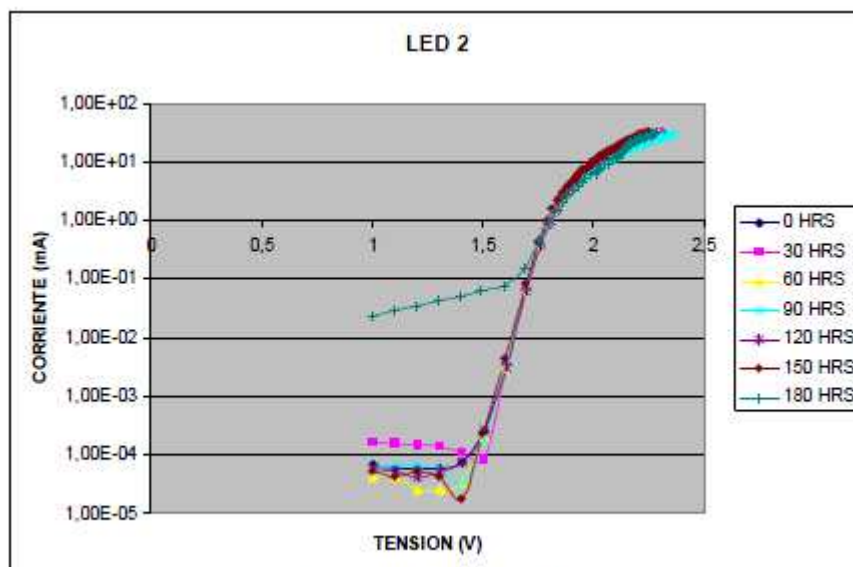
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo muy oxidado.

## LED 2



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

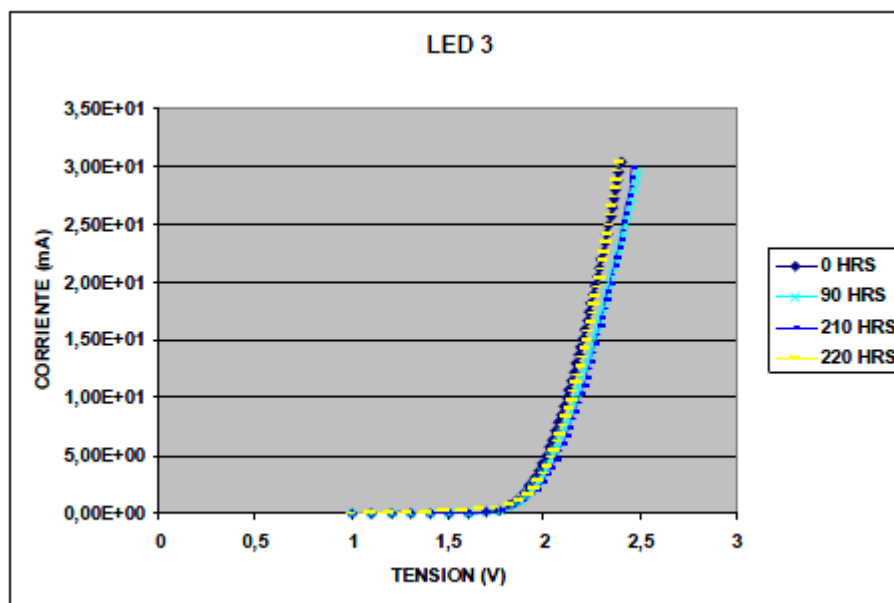
Este diodo presentó fallo a las 180 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 105 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



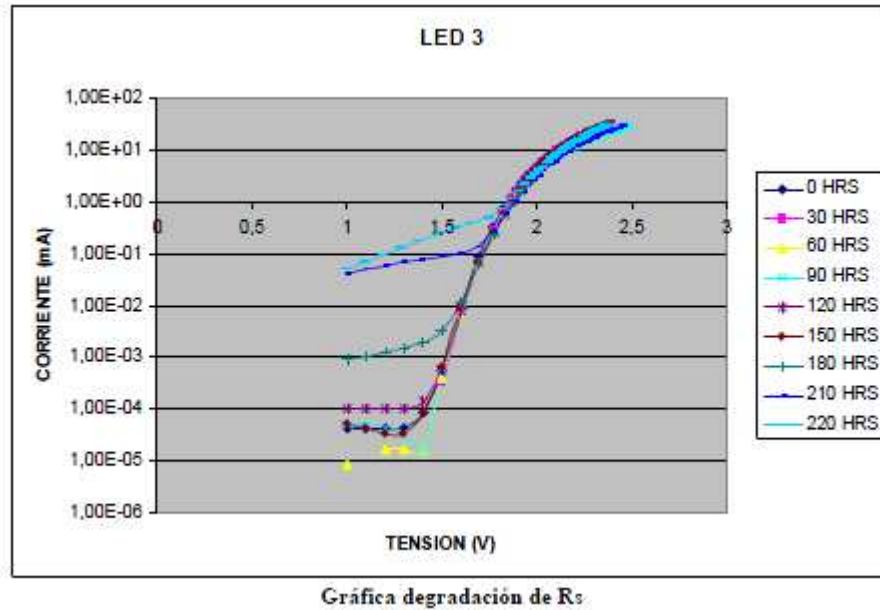
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 3



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 220 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 115 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

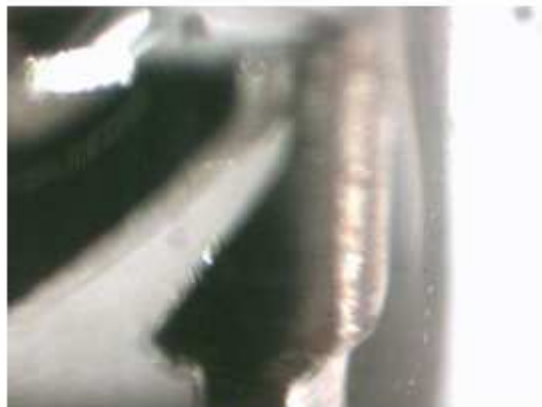
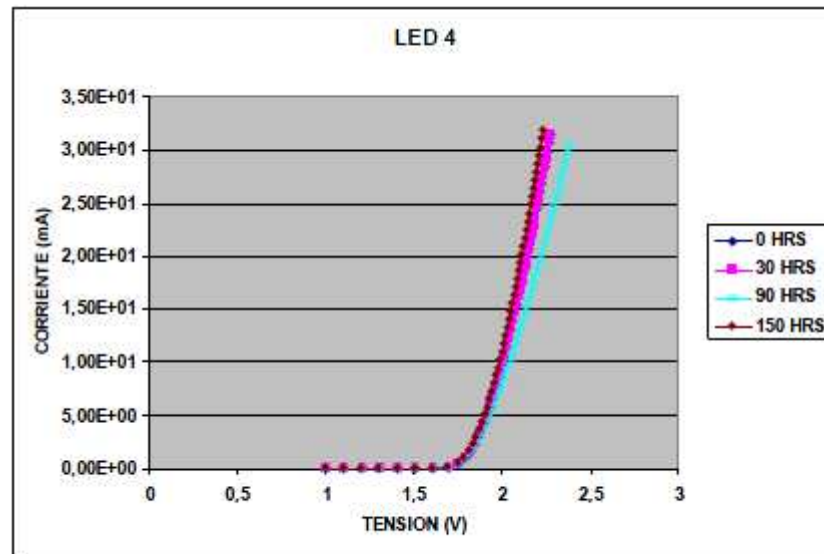


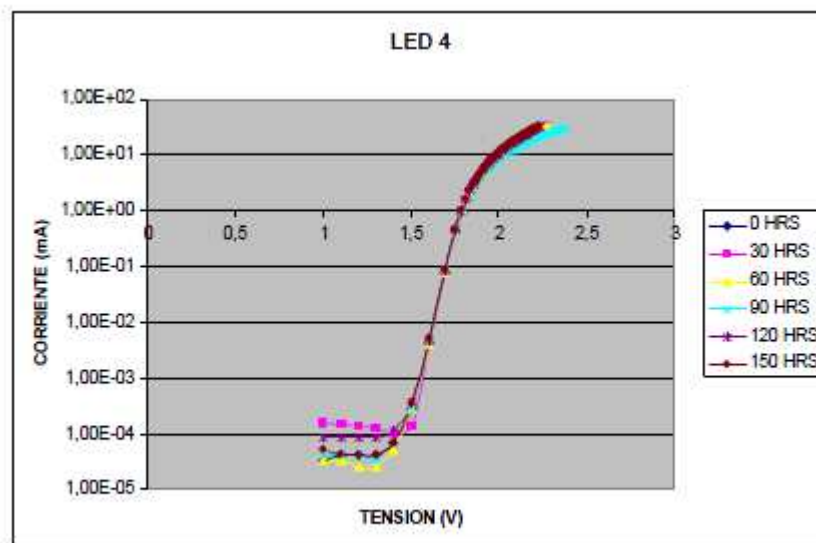
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 4



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 220 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 85 horas. Sin embargo, este diodo tuvo un comportamiento un poco especial, al fallar a las 180 horas con muy poca potencia y recuperarse a las 210 horas de nuevo. Es posible que se deba a que el óxido desapareció en parte

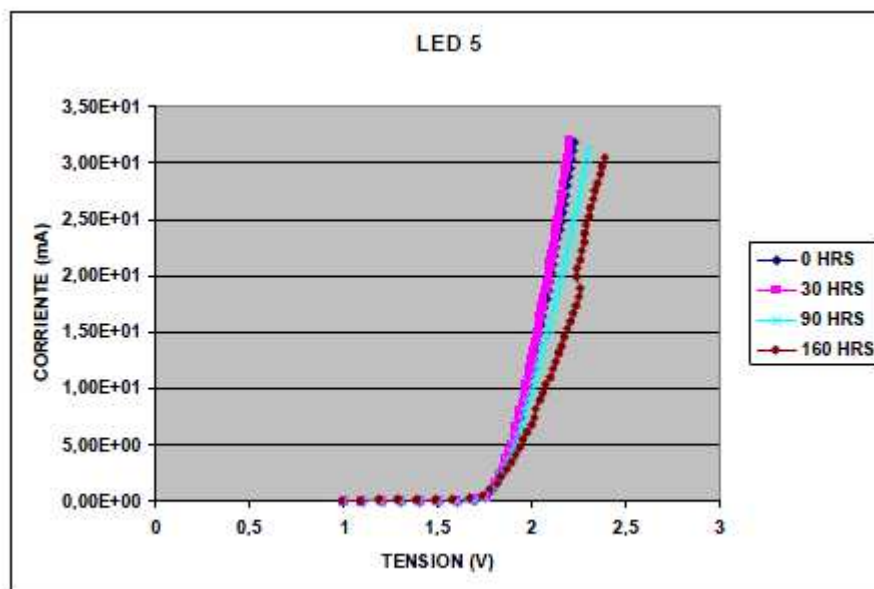
durante un periodo de tiempo, hasta que fallo de nuevo. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



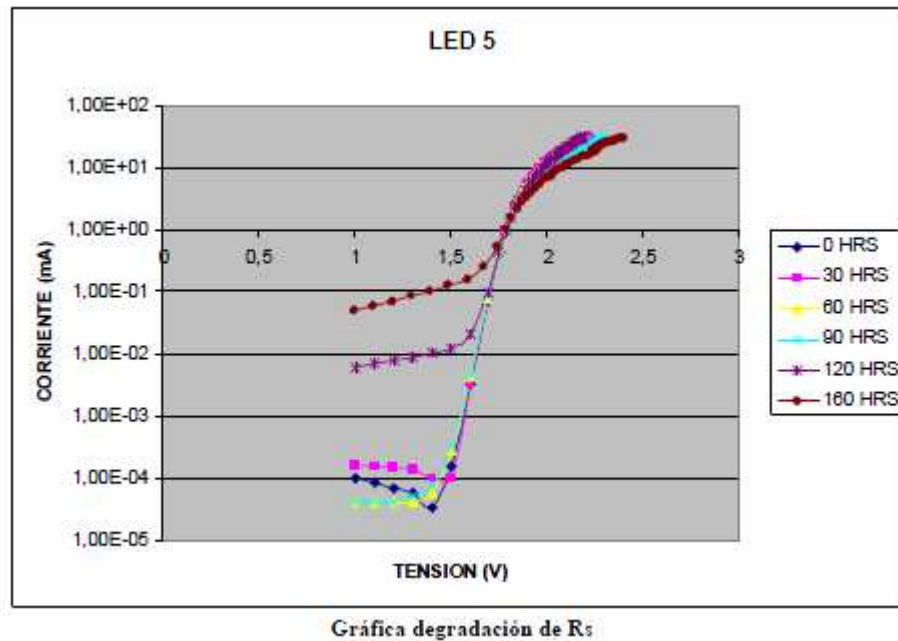
Foto: Anodo oxidado

Podemos observar que está oxidado.

### LED 5



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 160 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 70 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.

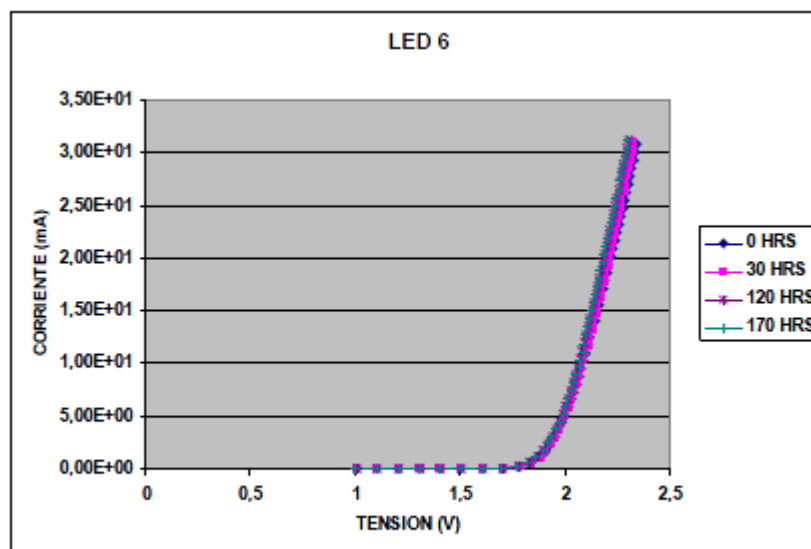


**Foto: Ánodo oxidado**

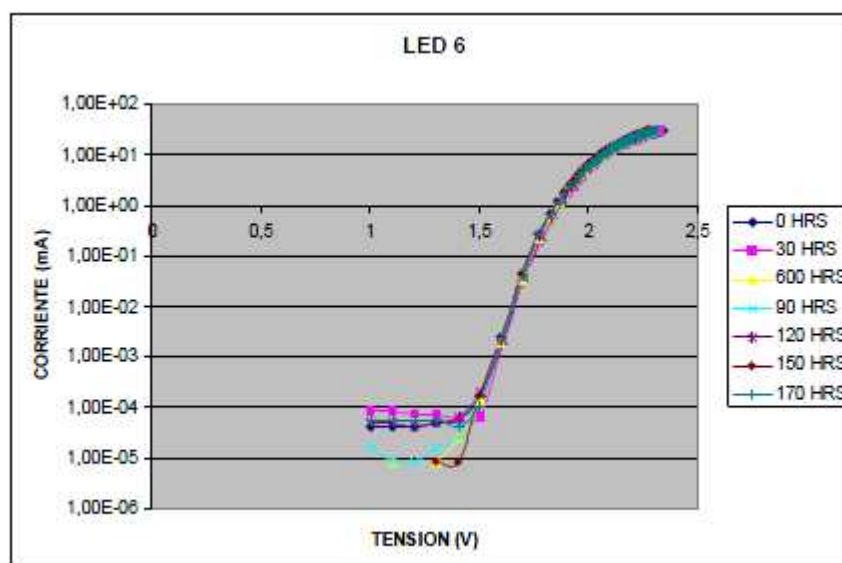
Ánodo bastante oxidado.



## LED 6



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

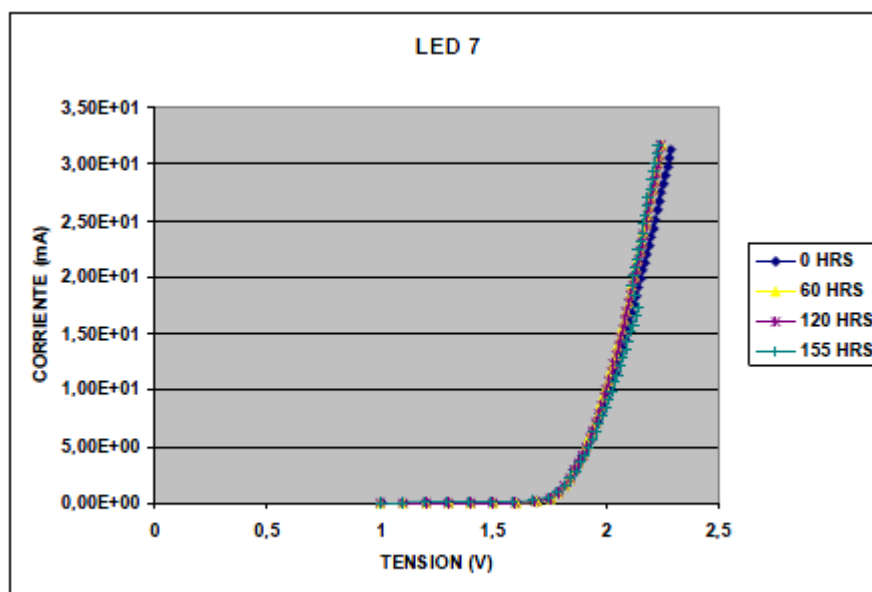
Este diodo presentó fallo a las 175 horas pero después se recuperó hasta el final del ensayo. No se observan variaciones significativas.



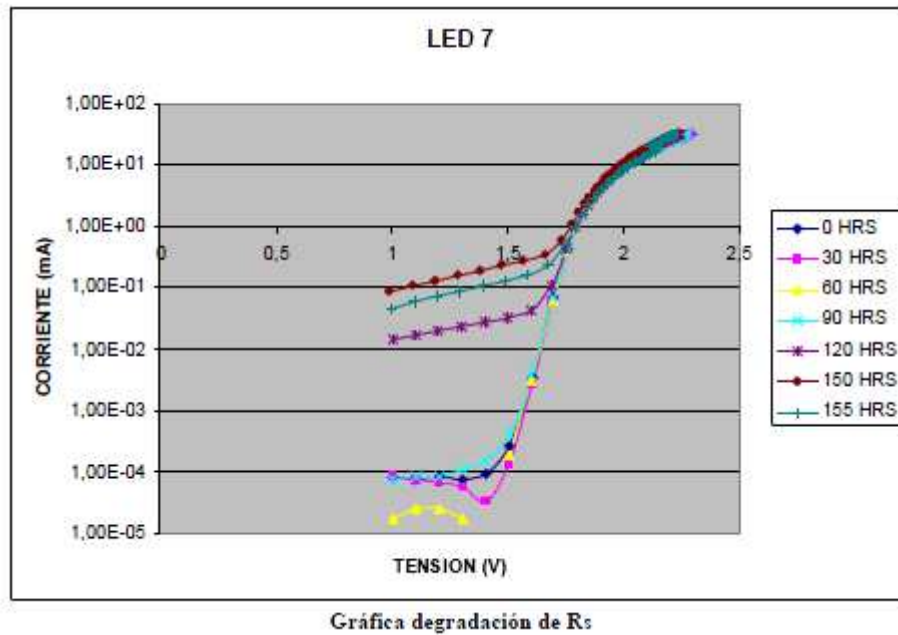
Foto: Anodo con apenas óxido

Muy poco óxido.

### LED 7



Gráfica V-I



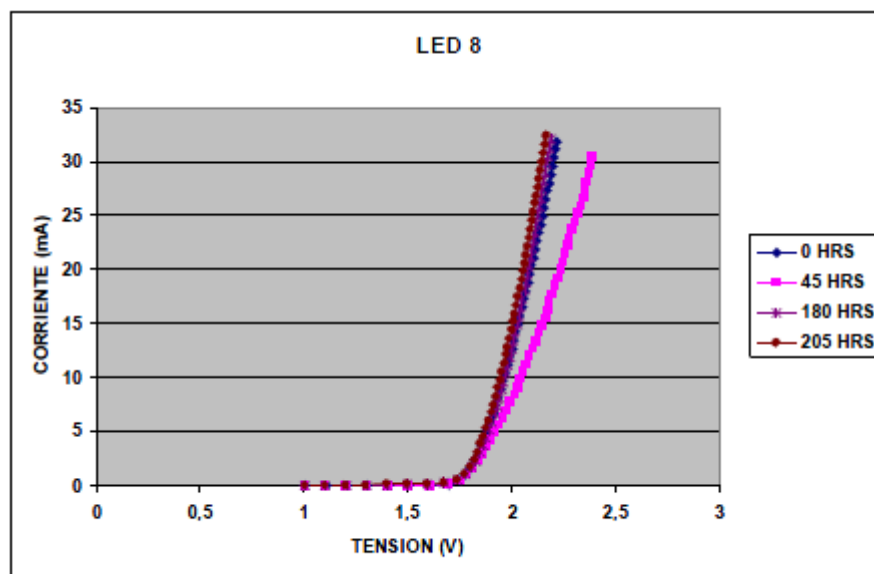
Este diodo presentó fallo a las 155 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 65 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación fuerte de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



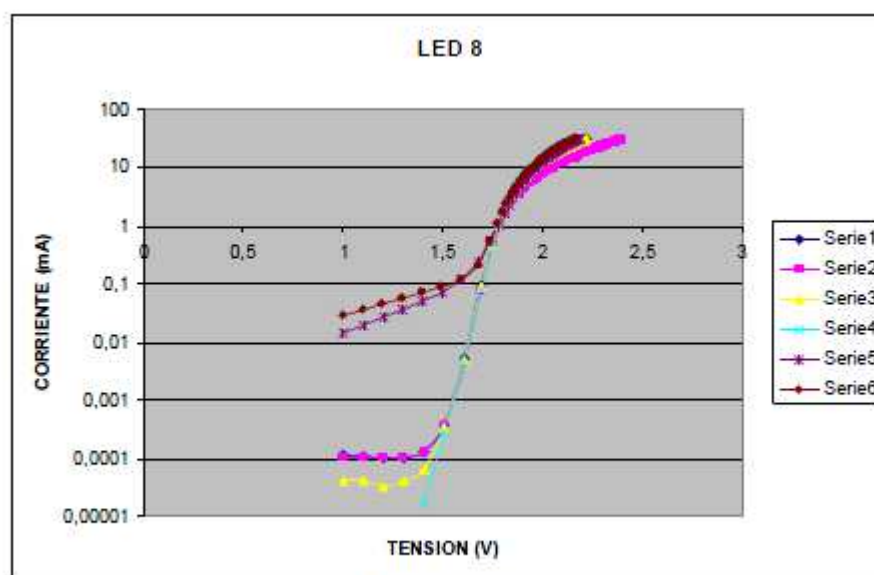
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo muy oxidado.

## LED 8



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

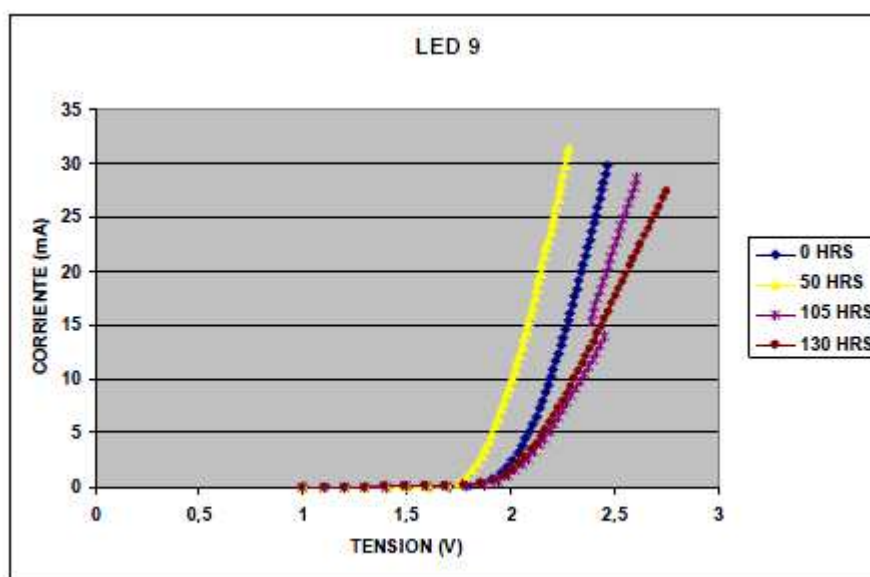
Este diodo presentó fallo a las 205 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 95 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



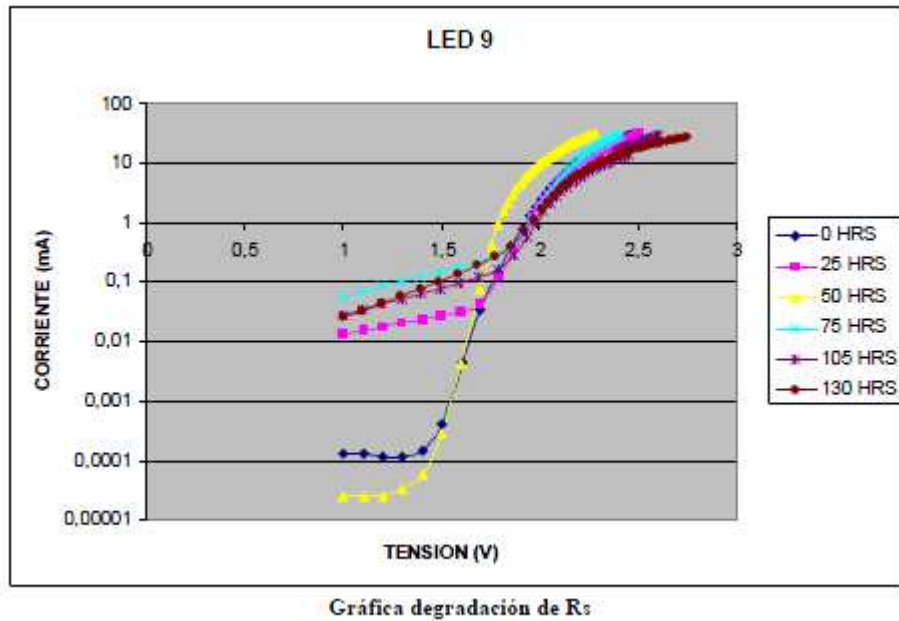
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 9



Gráfica V-I



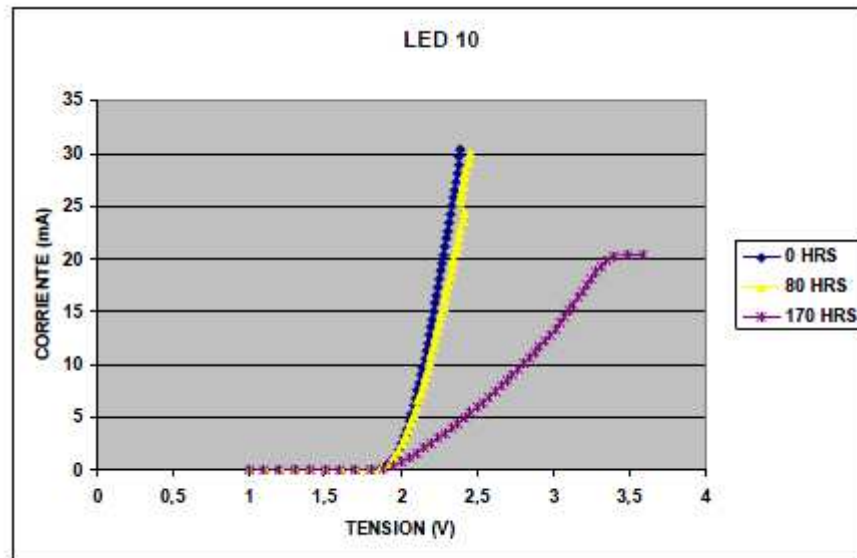
Este diodo presentó fallo a las 135 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 55 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación fuerte de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



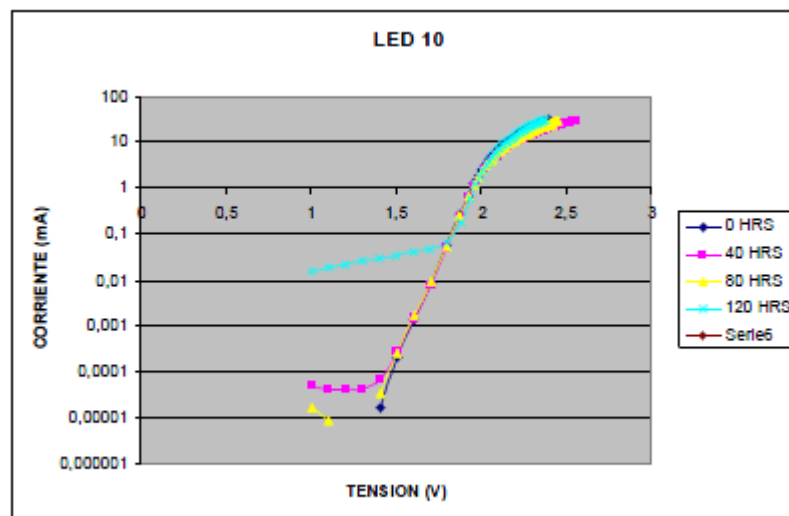
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo con mucha oxidación.

## LED 10



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

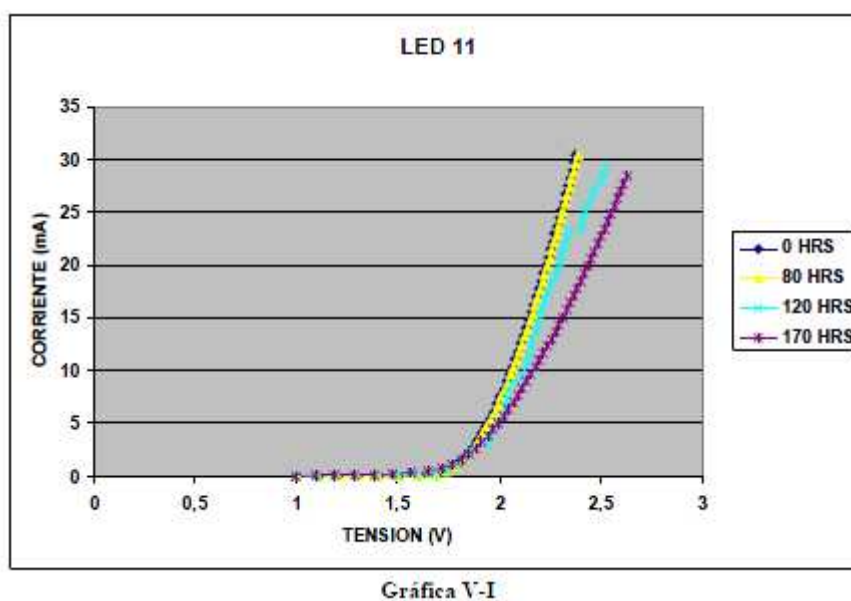
Este diodo presentó fallo a las 170 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 65 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



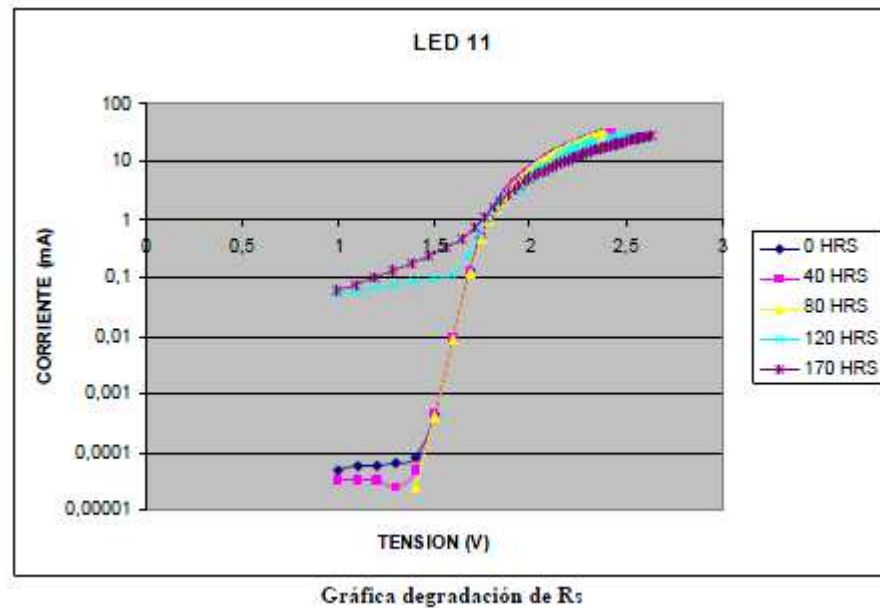
Foto: Ánodo con óxido

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 11







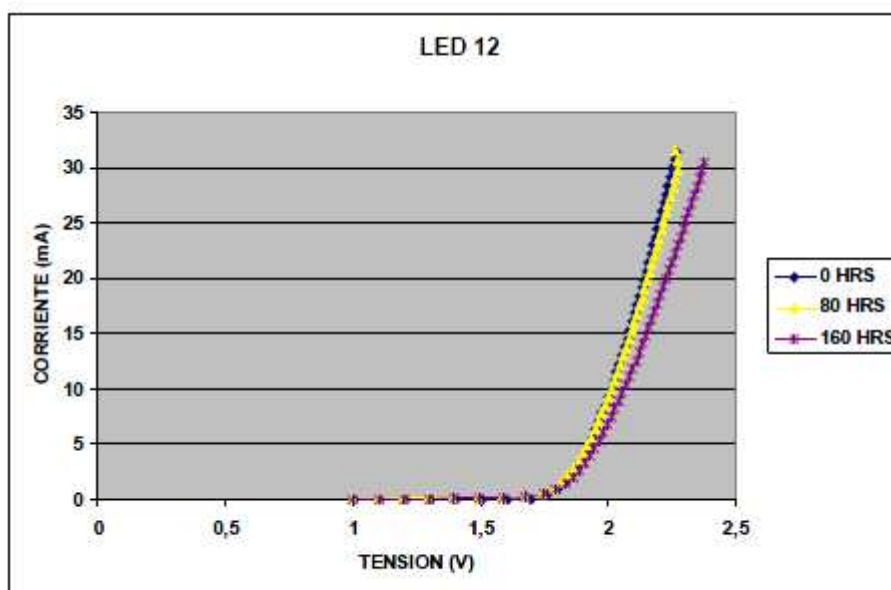
Este diodo presentó fallo a las 170 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 105 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



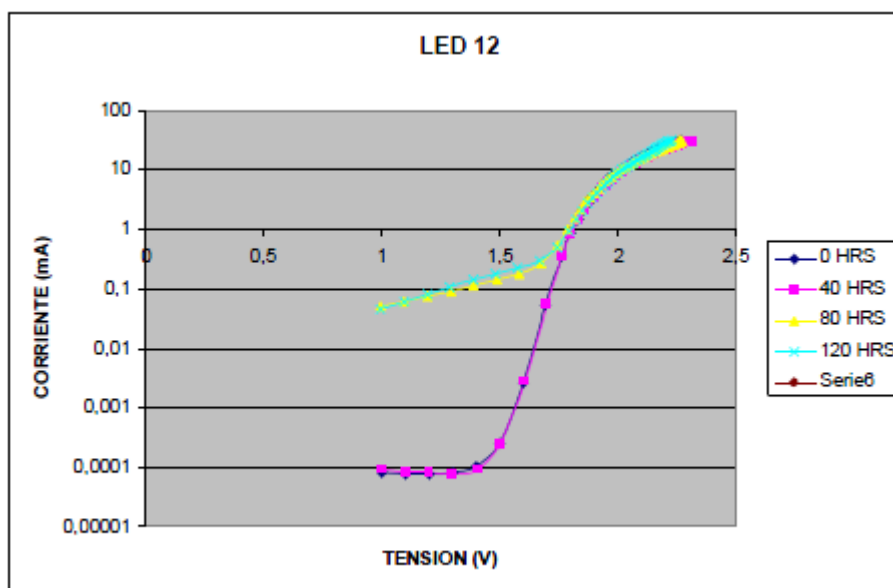
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 12



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

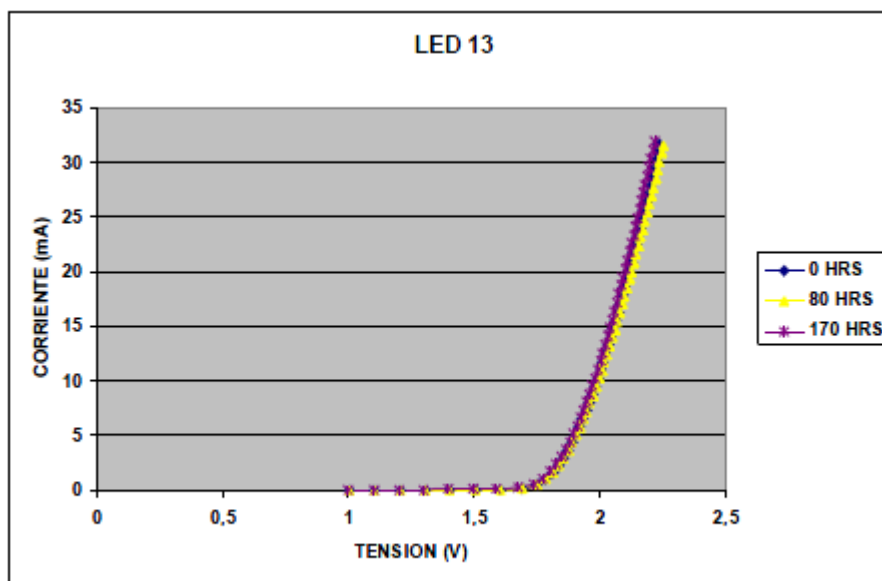
Este diodo presentó fallo a las 170 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 45 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



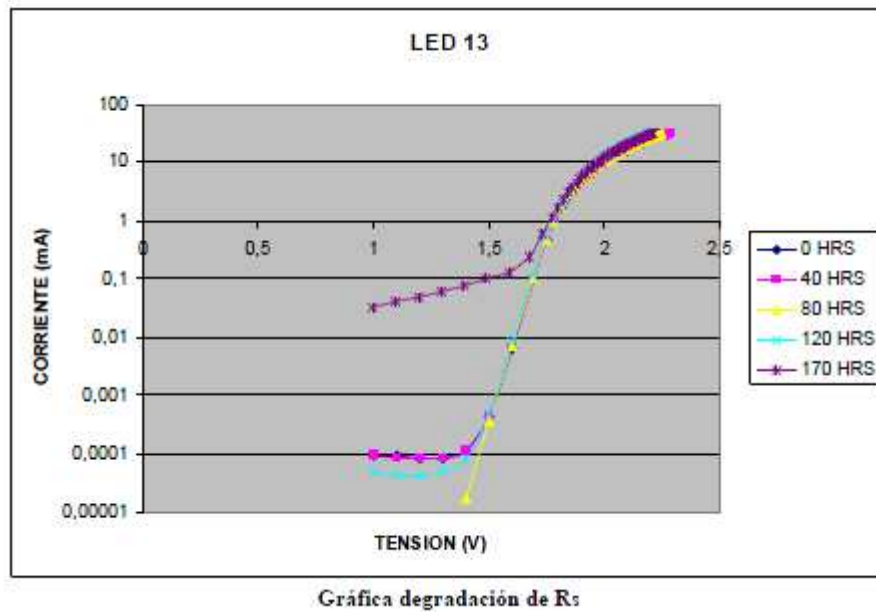
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 13



Gráfica V-I



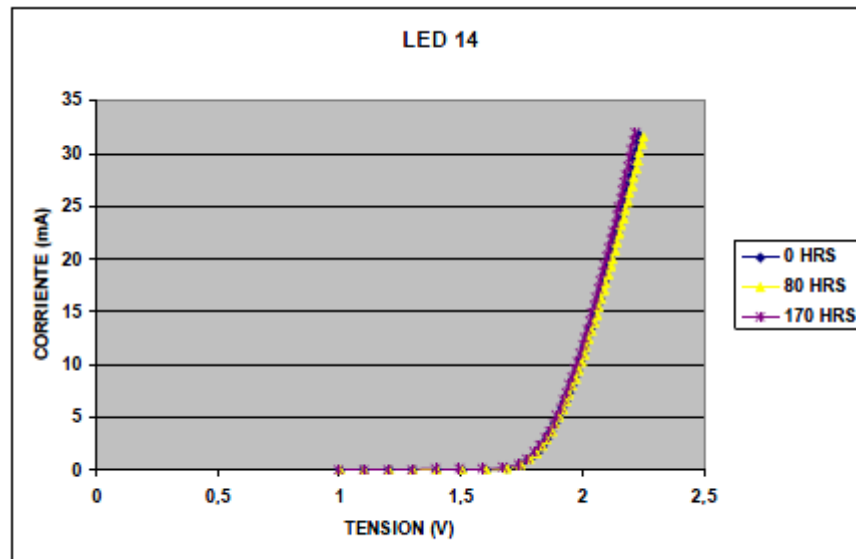
Este diodo presentó fallo a las 180 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 105 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



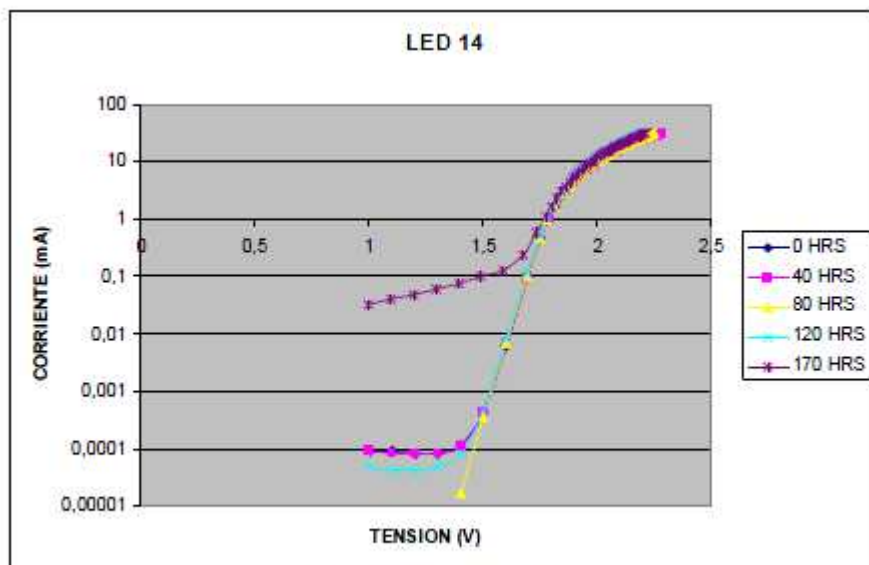
**Foto: Ánodo oxidado**

Se observa la oxidación del ánodo aunque la fotografía está un poco borrosa.

## LED 14



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

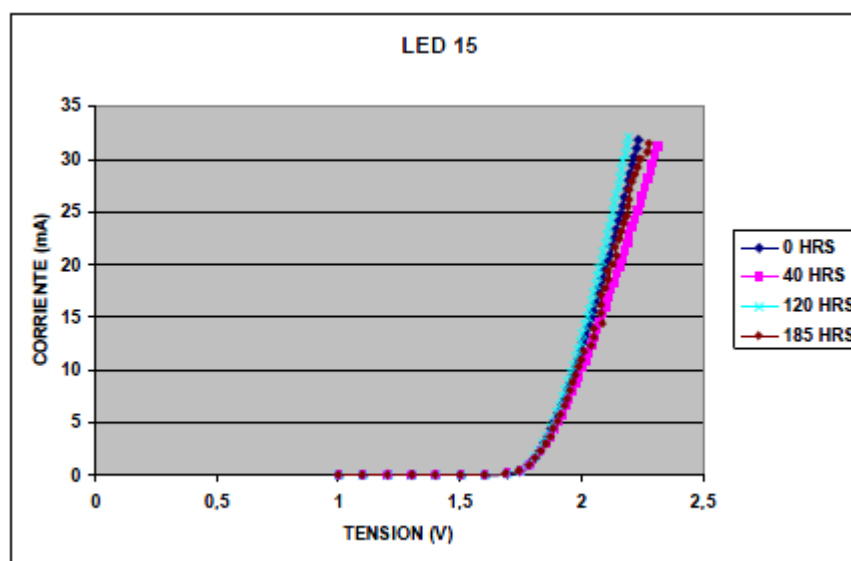
Este diodo presentó fallo a las 170 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 95 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación fuerte de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



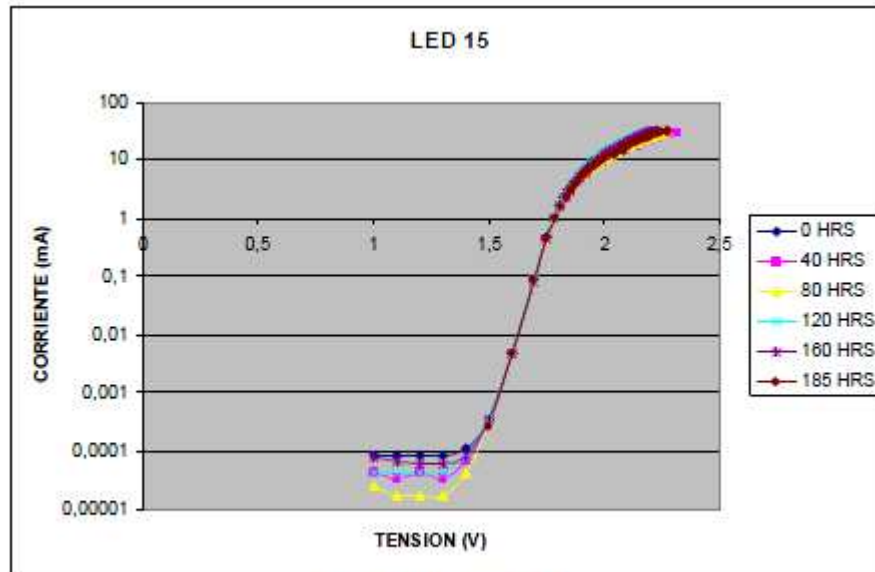
Foto: Anodo oxidado

Se observa claramente la oxidación del ánodo.

### LED 15



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 185 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 135 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



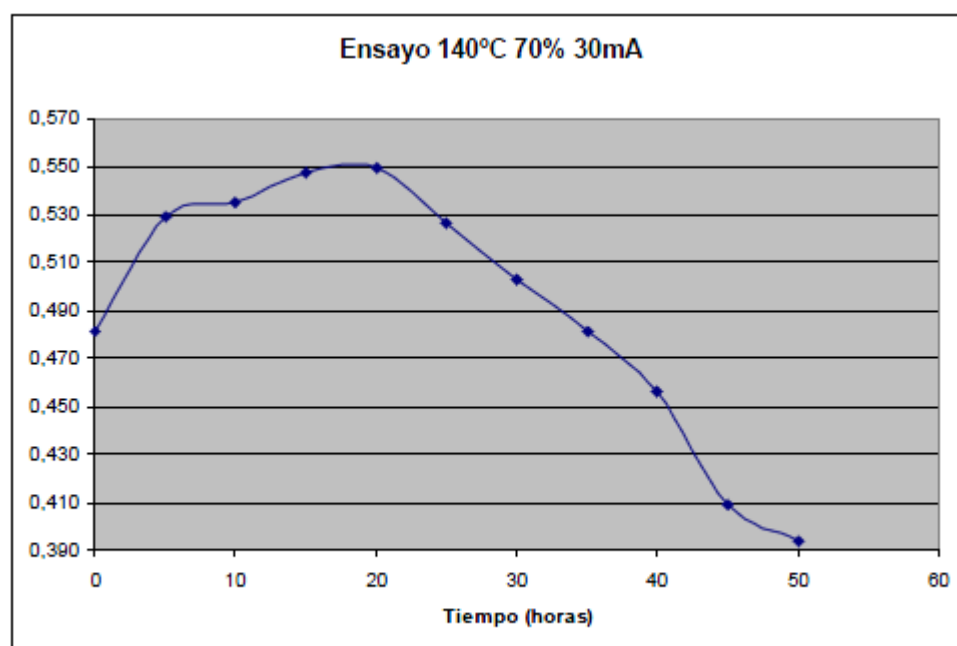
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### 5.3.5 ENSAYO 140 °C Y 70% HUMEDAD RELATIVA A 30mA

En este ensayo, uno de los diodos, como ya hemos visto que ha ocurrido en varios de los anteriores, no presentó fallo en todo el ensayo. Sin embargo, otro de ellos sufrió un fallo infantil, posiblemente debido a algún error de fabricación, ya que se observa que la humedad alcanzó rápidamente en el diodo. La duración total es de 80 horas.

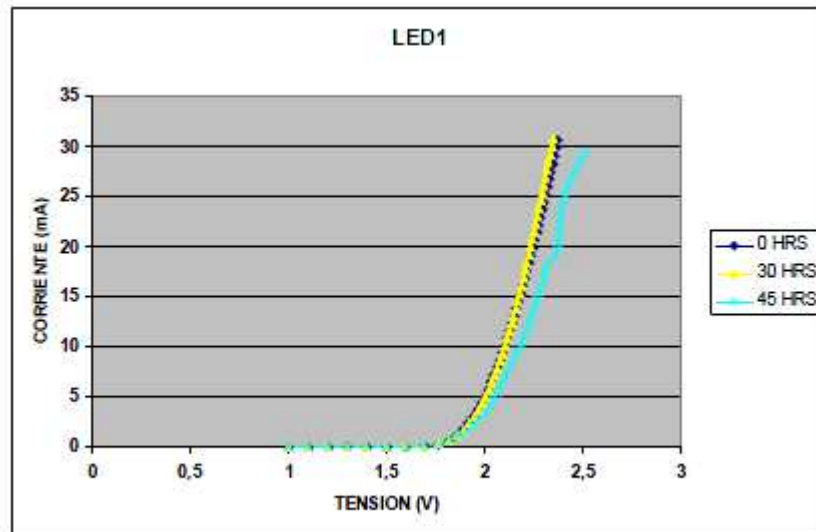
Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 50 horas debido a que los resultados a partir de las 55 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



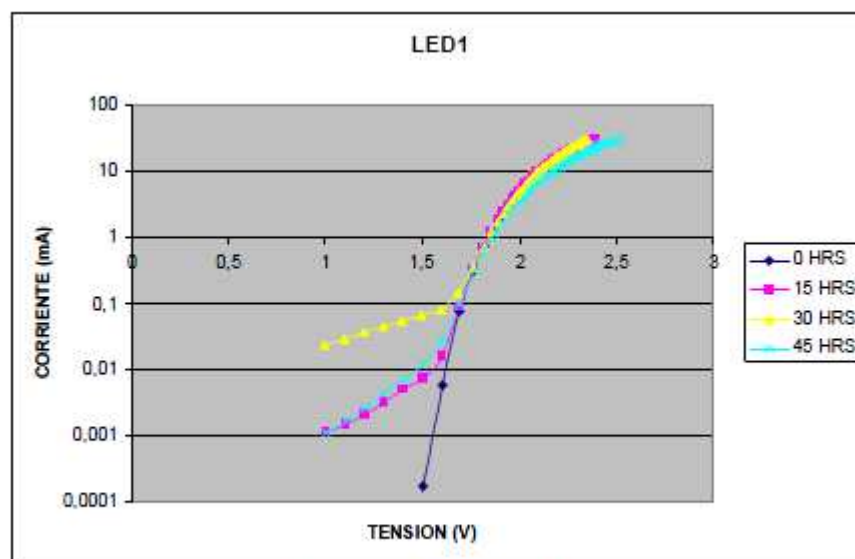
Gráfica de la potencia media del ensayo



## LED 1



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

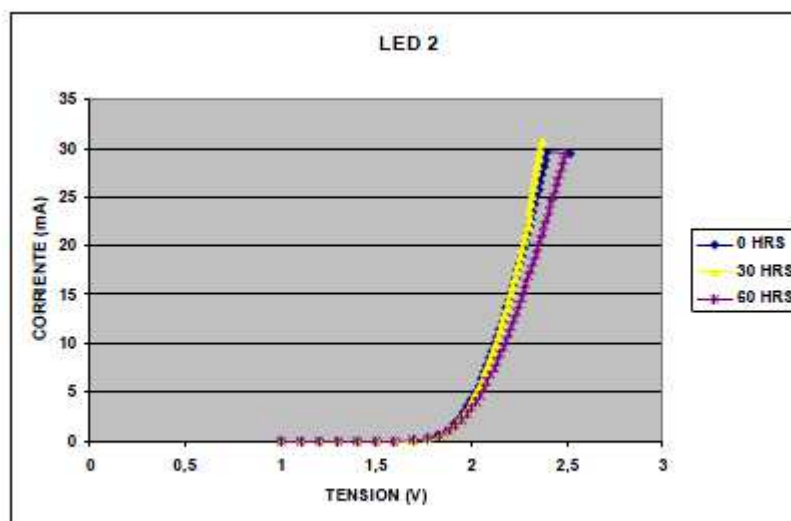
Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe moderada degradación de la curva I-V.



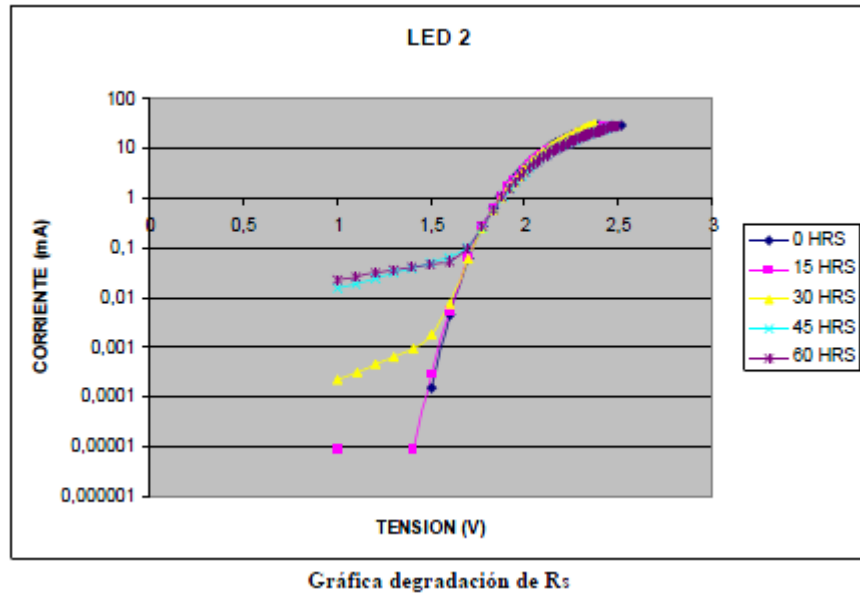
Foto: Anodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

## LED 2



Gráfica V-I



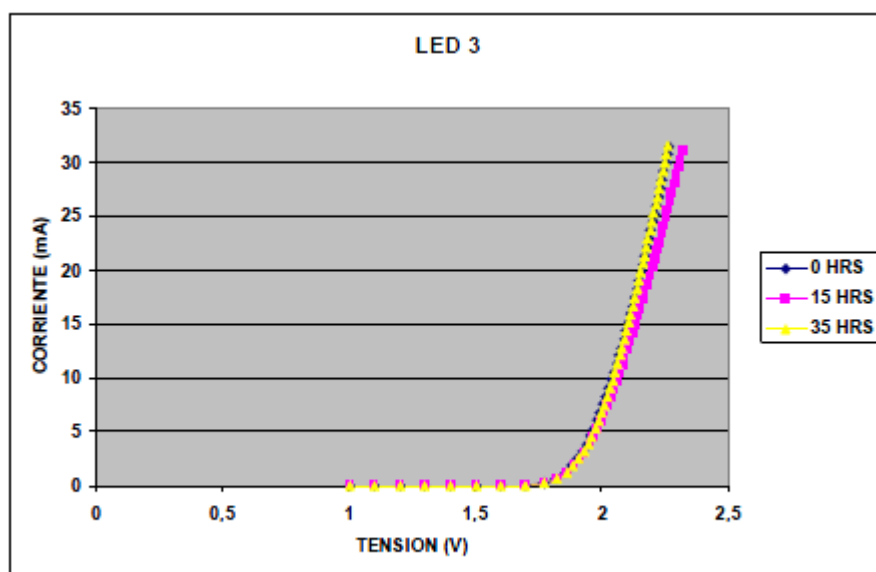
Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



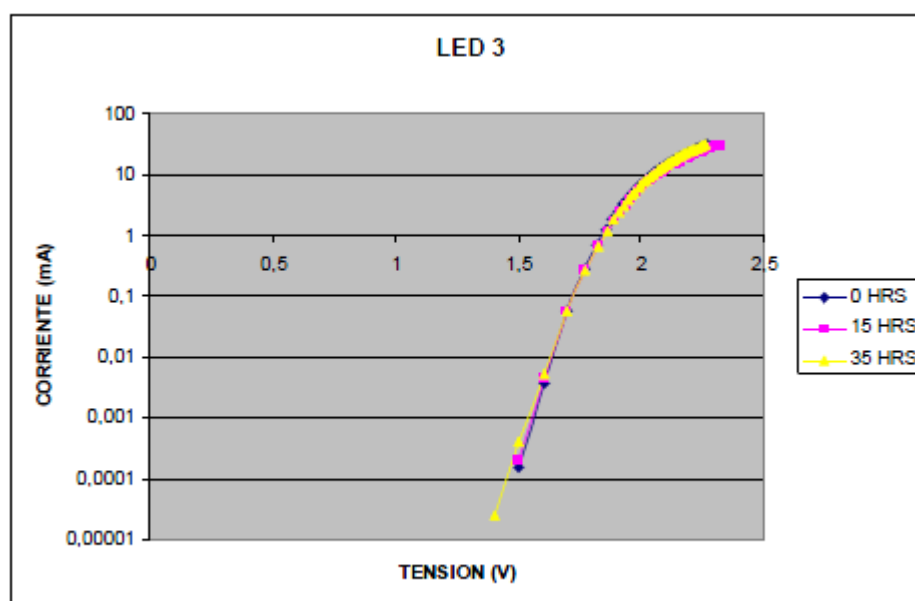
Foto: Encapsulado deteriorado

En este diodo el encapsulado se degradó, además de presentar poco óxido en el ánodo.

## LED 3



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

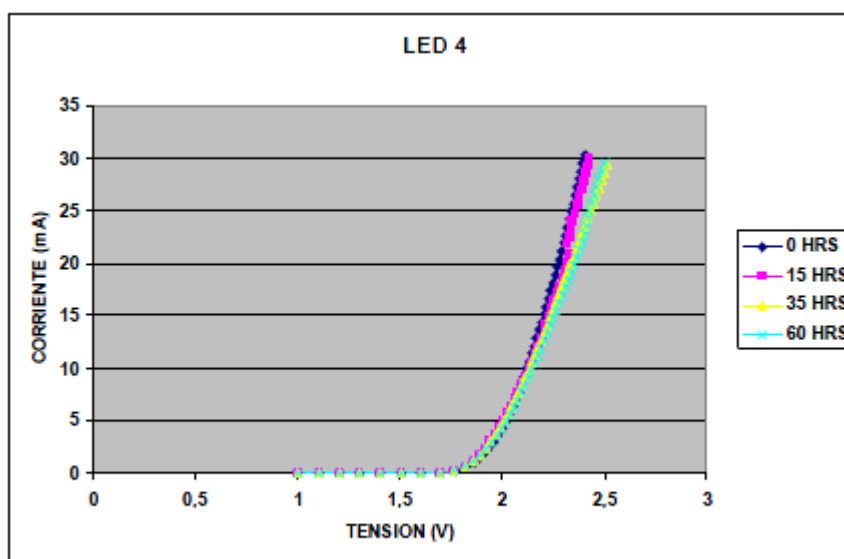
Este diodo presentó fallo a las 35 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



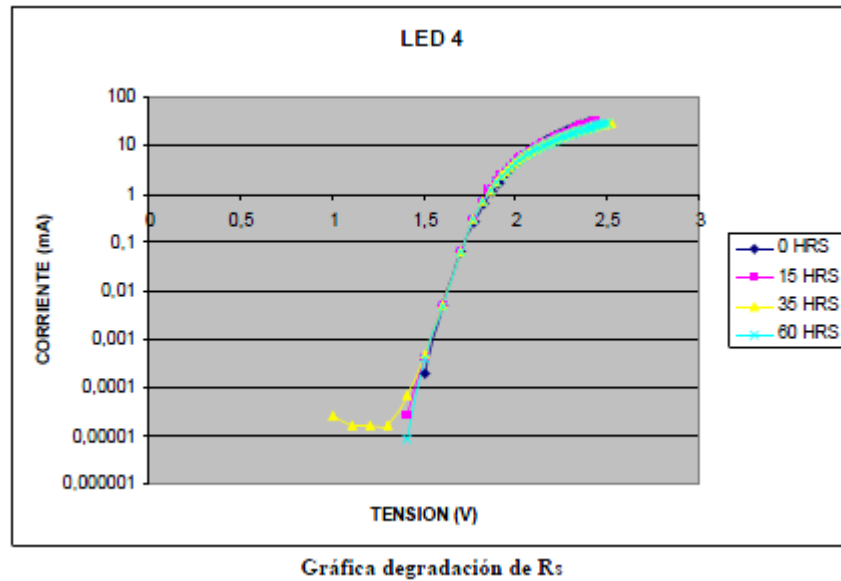
Foto: Anodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

#### LED 4



Gráfica V-I



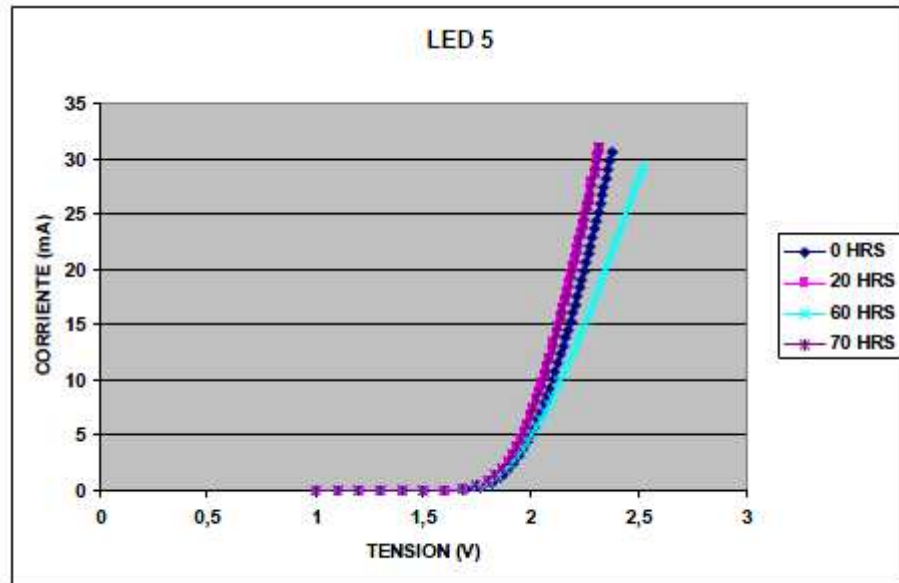
Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



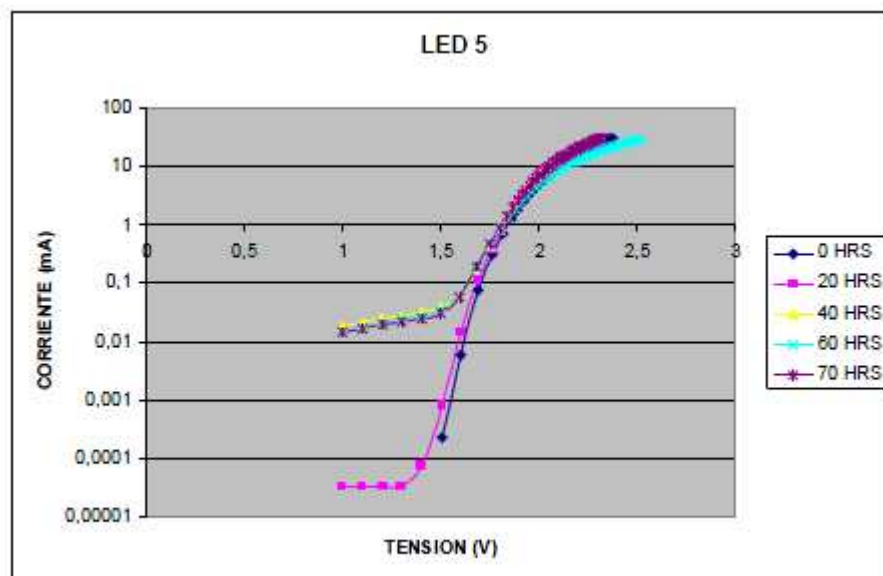
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo, un poco más que los anteriores.

## LED 5



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

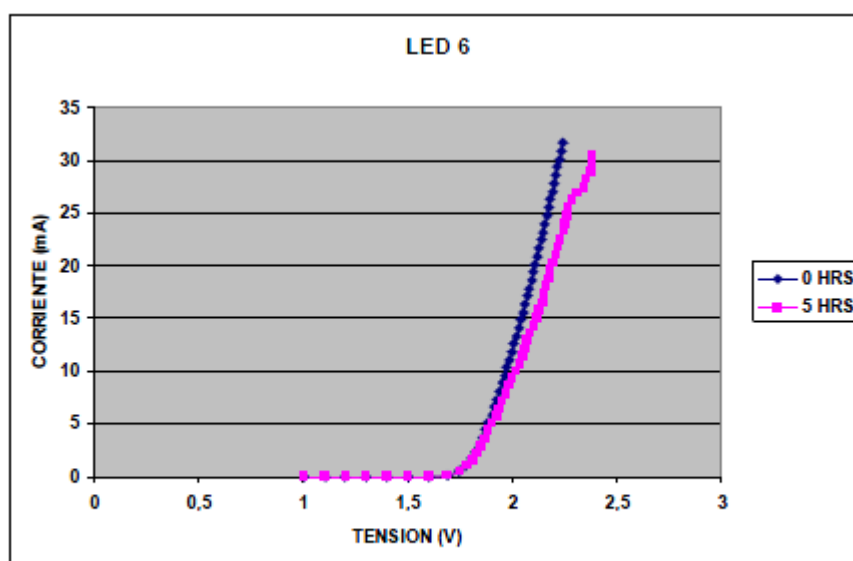
Este diodo presentó fallo a las 70 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



Foto: Ánodo oxidado

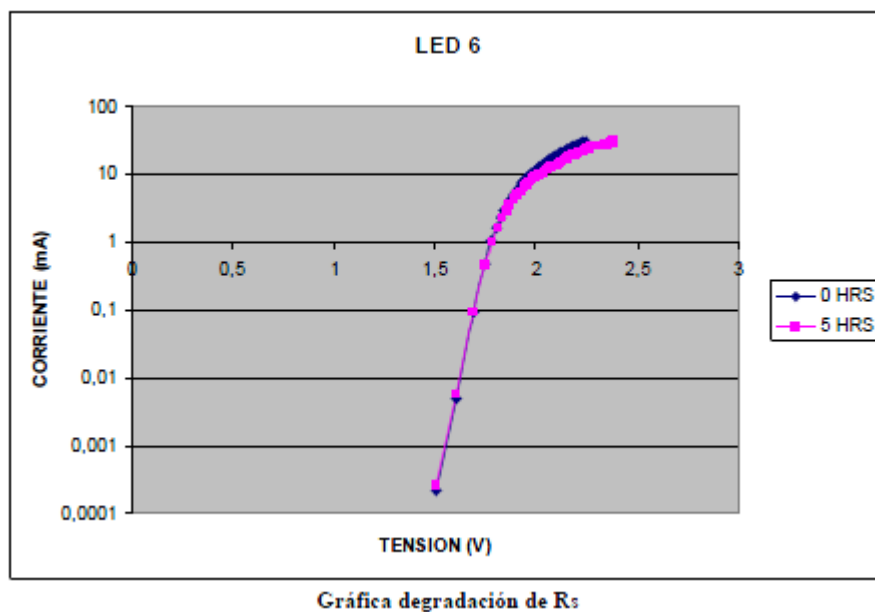
Ánodo muy poco oxidado.

## LED 6



Gráfica V-I





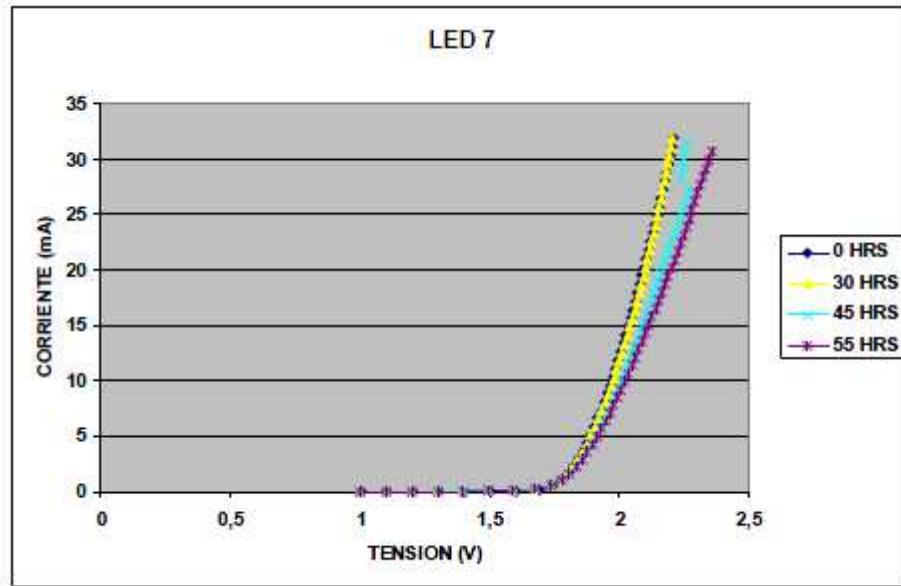
Este diodo presentó fallo a las 5 horas de ensayo, probablemente debido a problemas de fabricación. Los resultados no aportan datos relevantes.



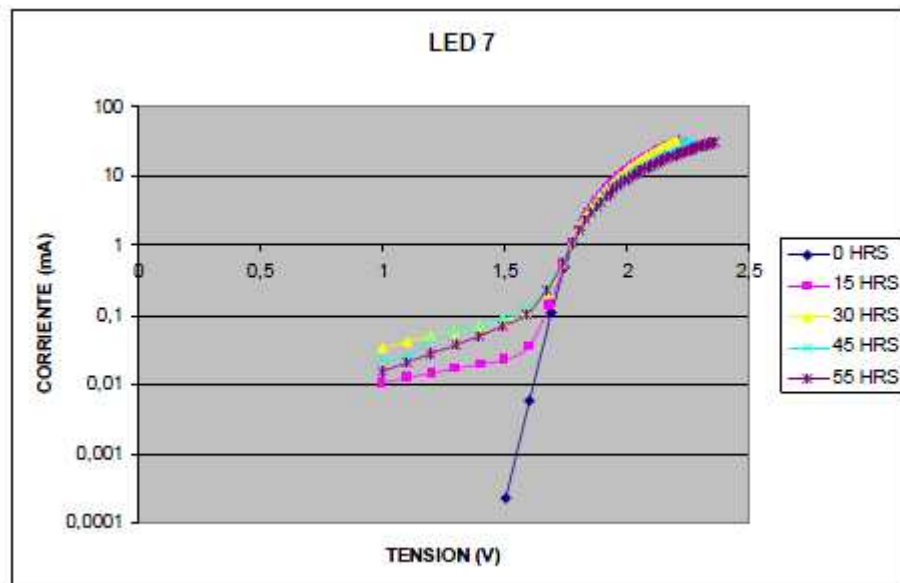
**Foto: Ánodo oxidado**

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 7



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

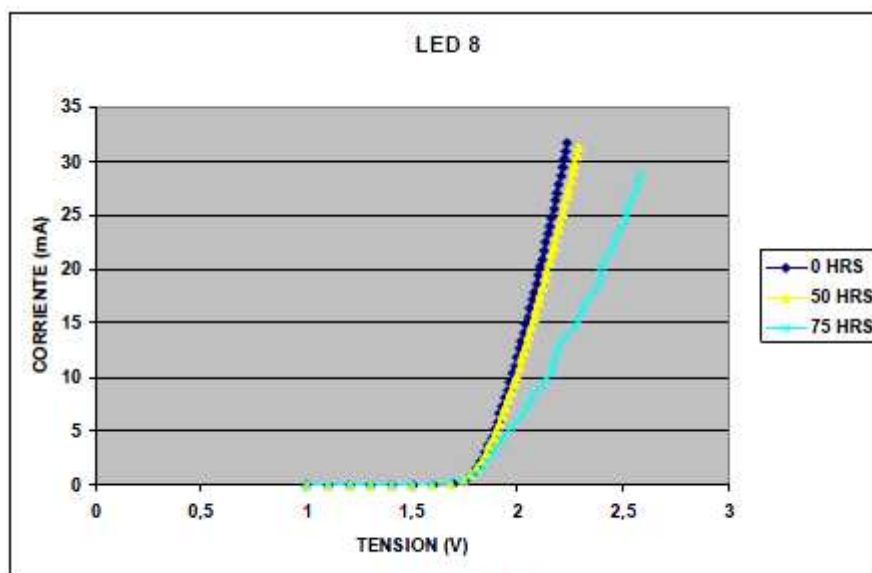
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe moderada degradación de la curva I-V.



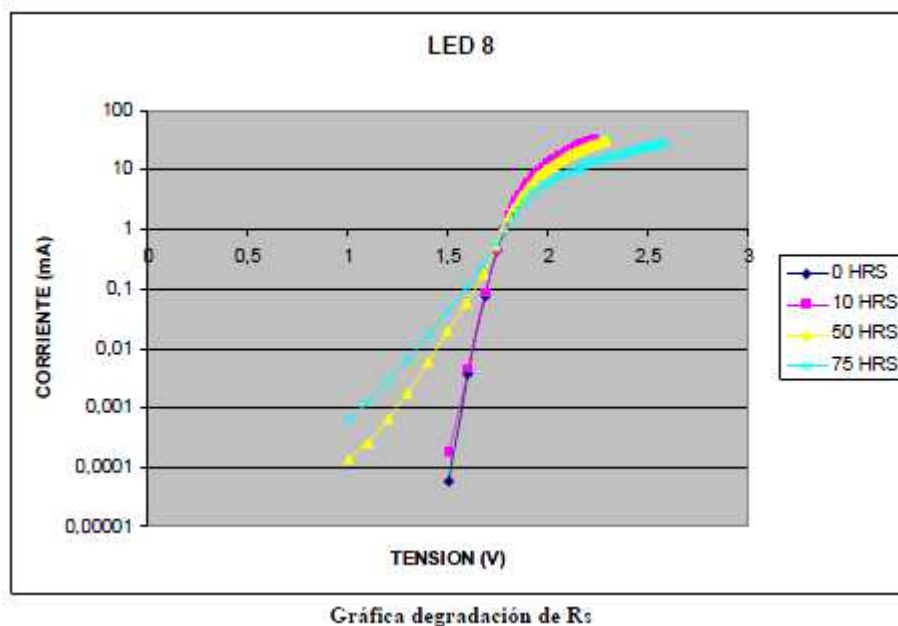
Foto: Ánodo apenas oxidado

En este diodo la humedad no penetró al igual que en el resto, no presenta oxidación a simple vista.

### LED 8



Gráfica V-I



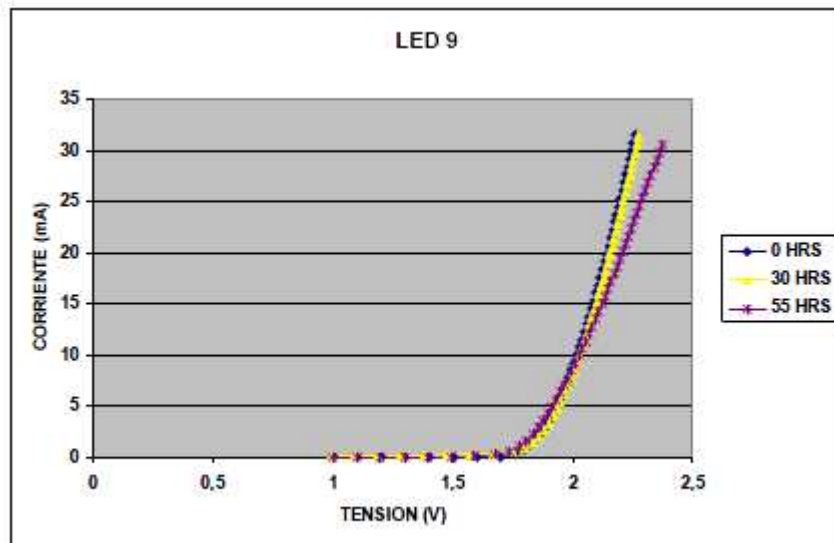
Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Sin embargo, al igual que en otro diodo anterior, a las 10 horas se produjo el fallo pero después se recuperó. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



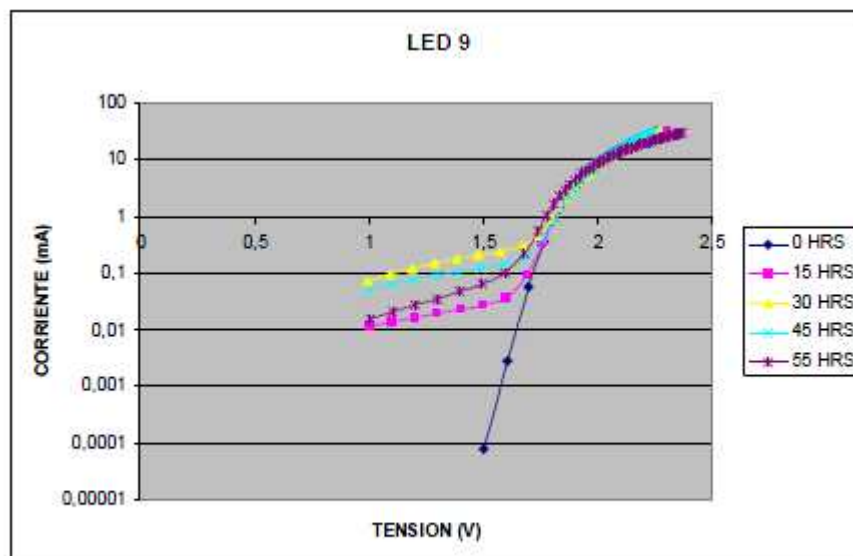
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 9



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

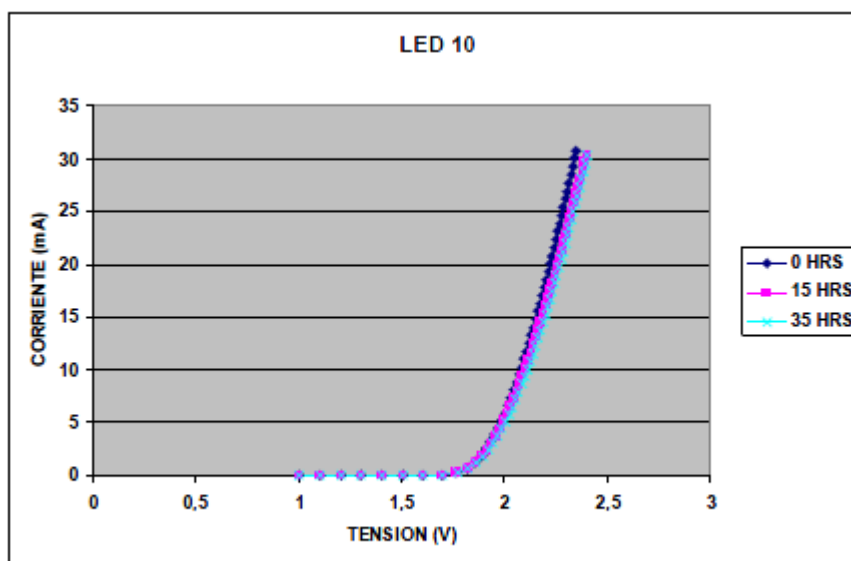
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



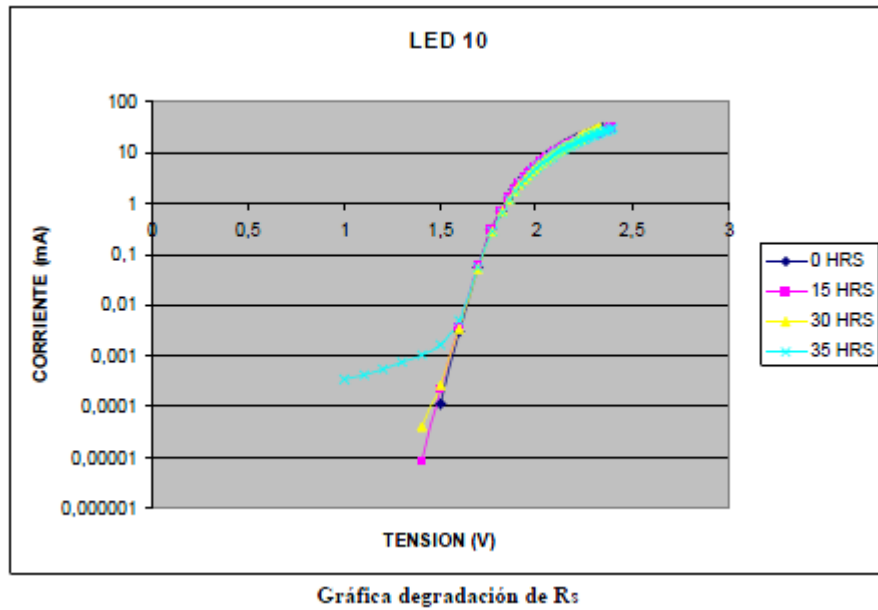
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 10



Gráfica V-I

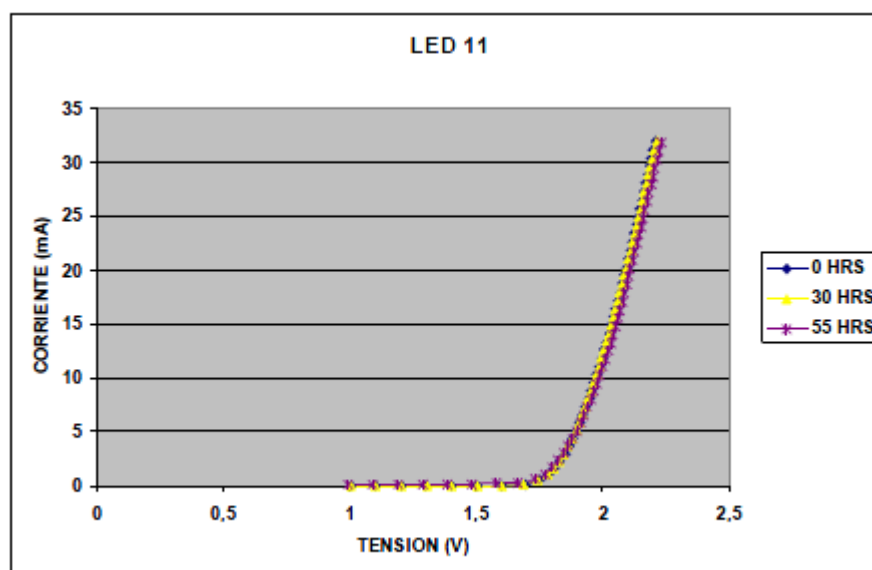


Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

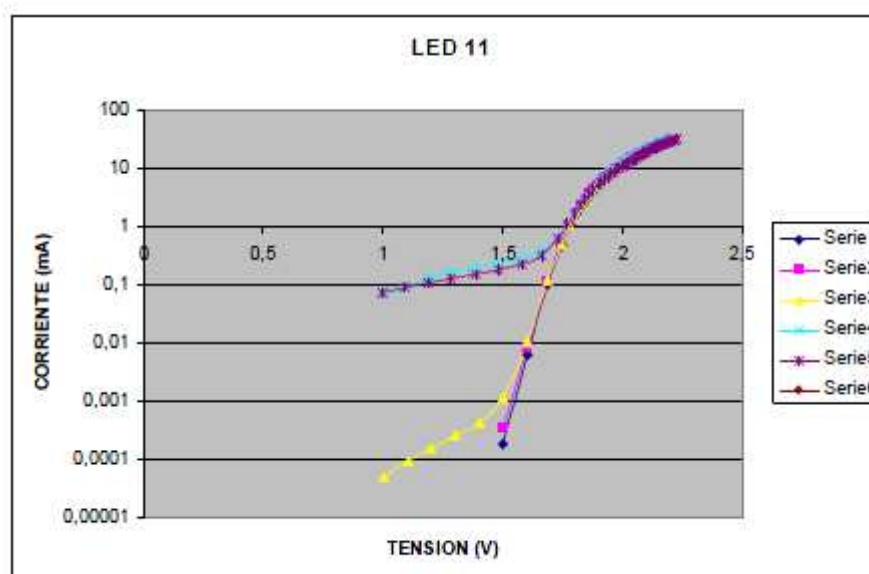


Foto: Ánodo con óxido

Se observa la oxidación del ánodo.

**LED 11**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

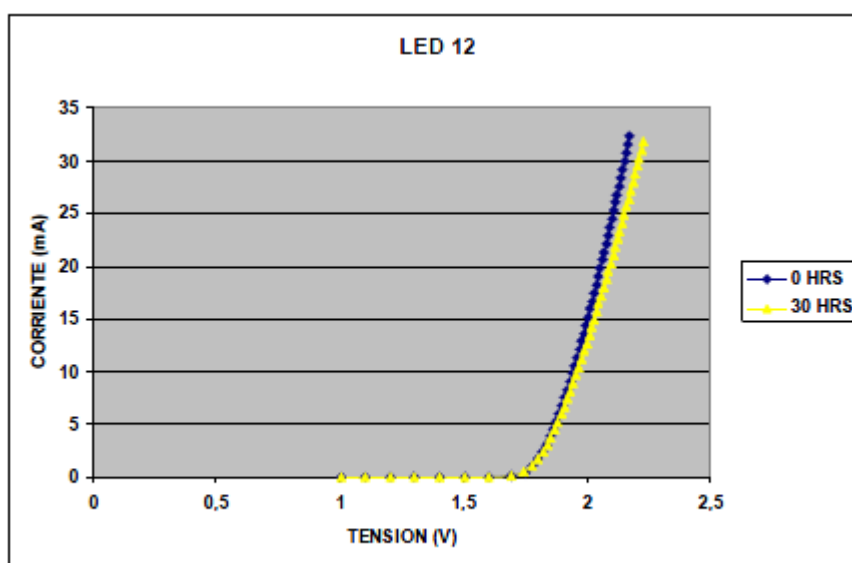




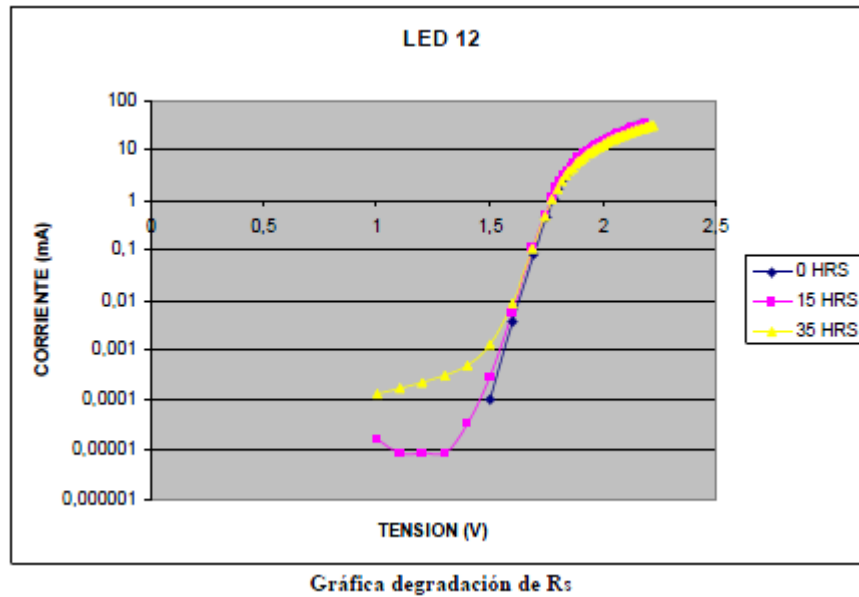
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 12



Gráfica V-I

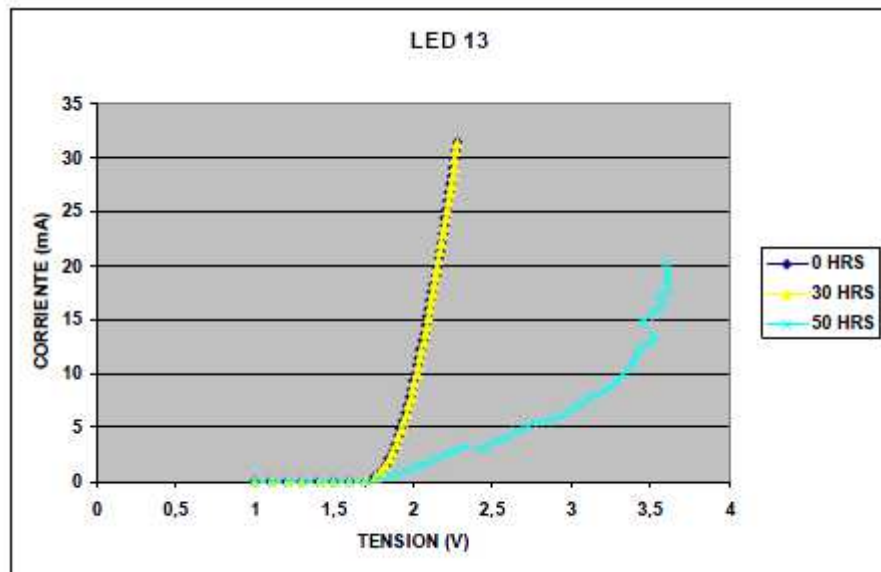


Este diodo presentó fallo a las 35 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

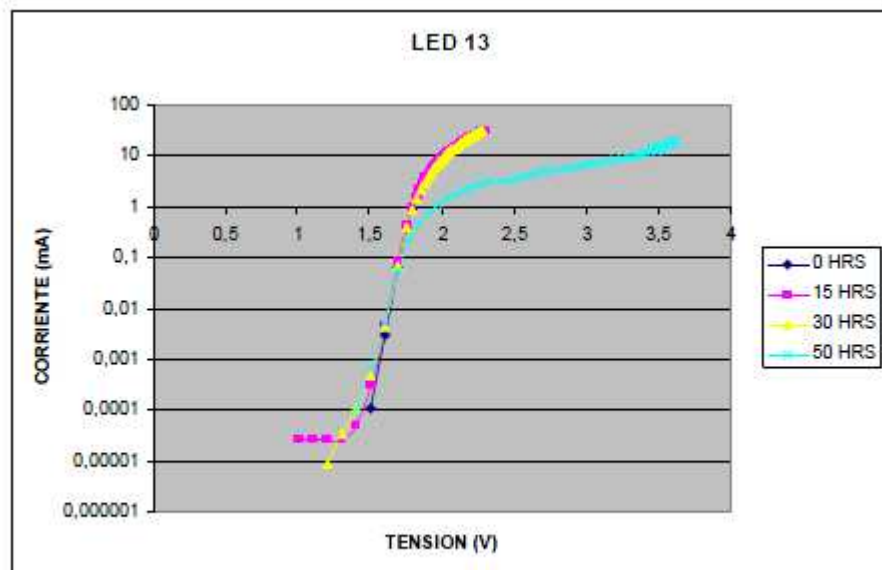


**Foto: Ánodo oxidado**

Se observa la oxidación del ánodo.

**LED 13**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

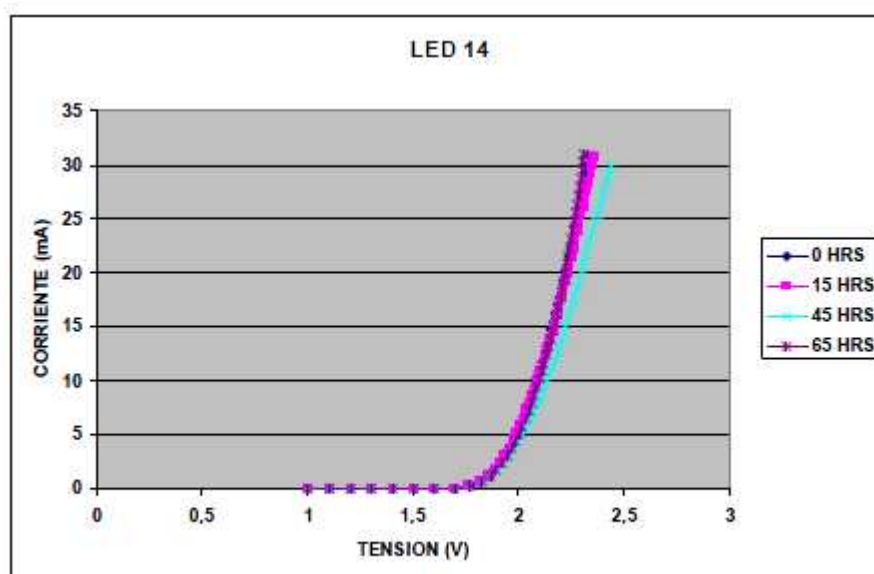
Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



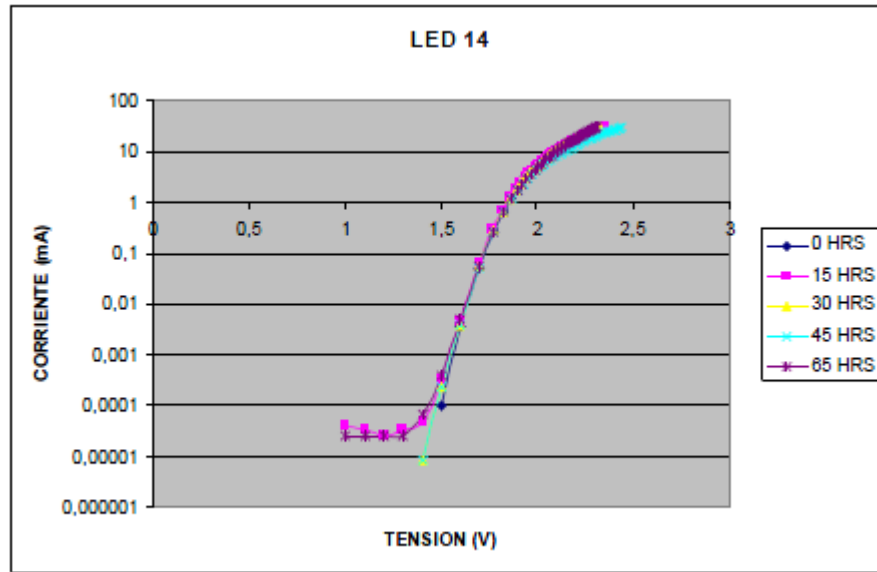
Foto: Ánodo oxidado

Ánodo oxidado.

### LED 14



Gráfica V-I

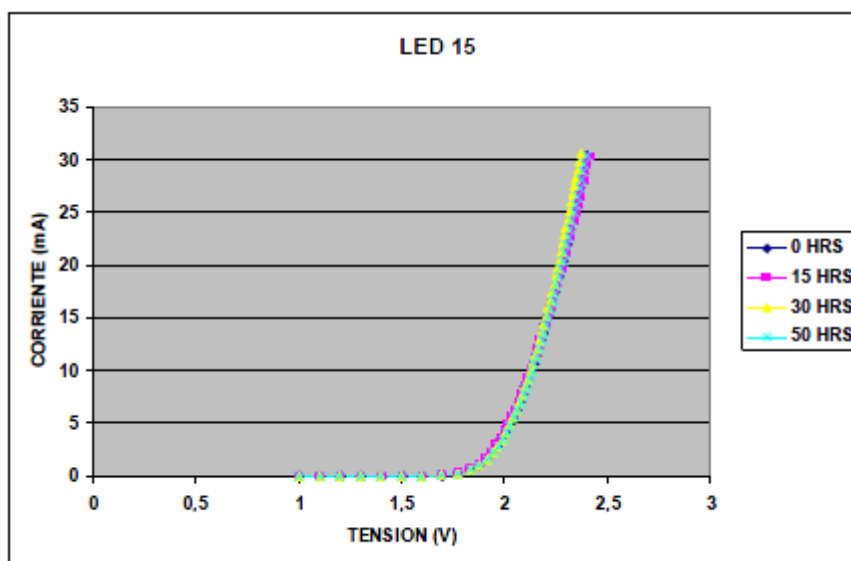


Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 25 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

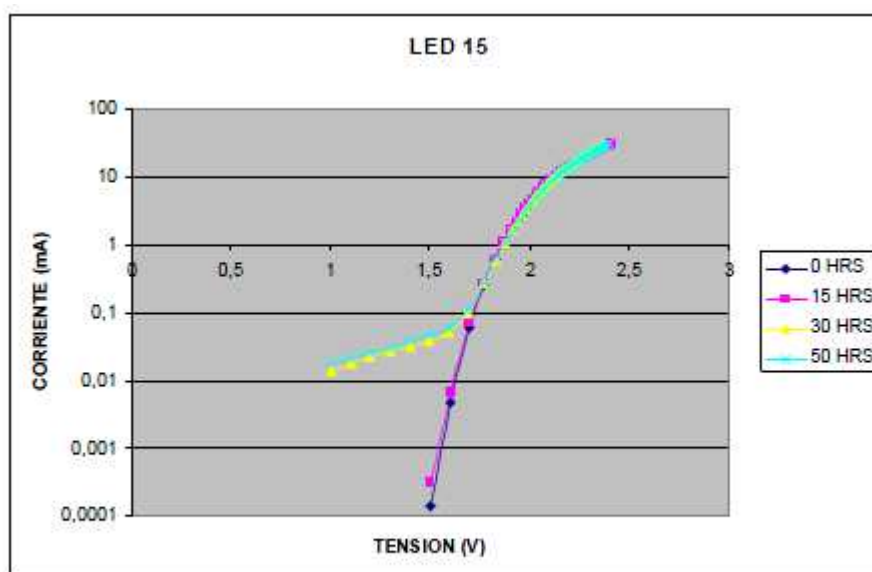


**Foto: Ánodo oxidado**

De nuevo, se comprueba la oxidación del ánodo.

**LED 15**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 50 horas. A las 20 horas llega a un máximo de potencia para luego bajar hasta las 50 horas donde alcanza el máximo y a partir de ahí deja de funcionar. Esto puede ser debido a un fallo a la hora de medir. Se puede apreciar en las gráficas que a medida que pasa el tiempo se produce un aumento de  $R_s$  y una gran variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

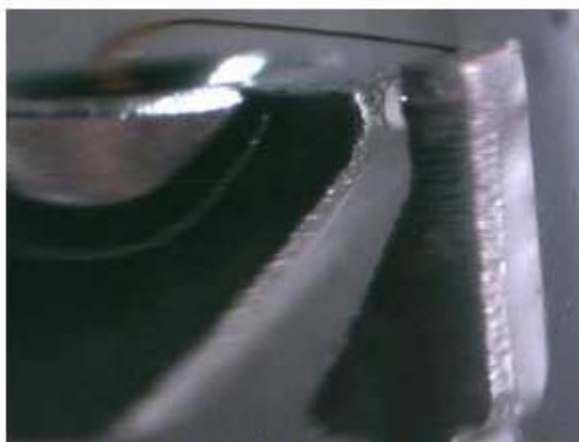


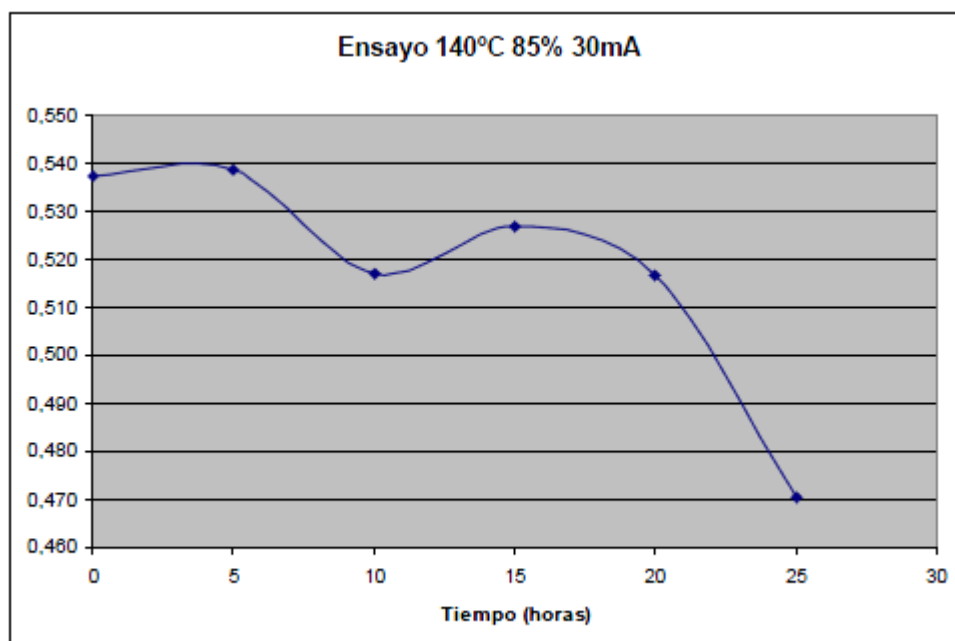
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

#### 5.3.6 ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA

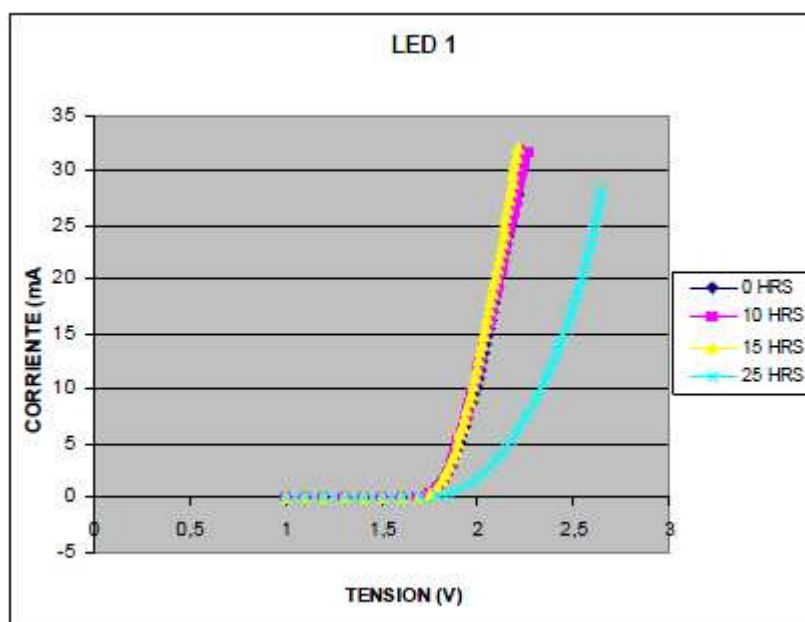
Se trata del ensayo condiciones generales más duras a los que hemos sometido a los diodos, las previsiones eran de una duración corta debido a esto, y así fue. No obstante cabe destacar que en este ensayo dos de los diodos no presentaron fallo al final del ensayo. De otra manera, uno de ellos sufrió un fallo infantil debido a la rotura de la pata del ánodo. La duración total del ensayo ha sido de 50 horas.

Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 25 horas debido a que los resultados a partir de las 30 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



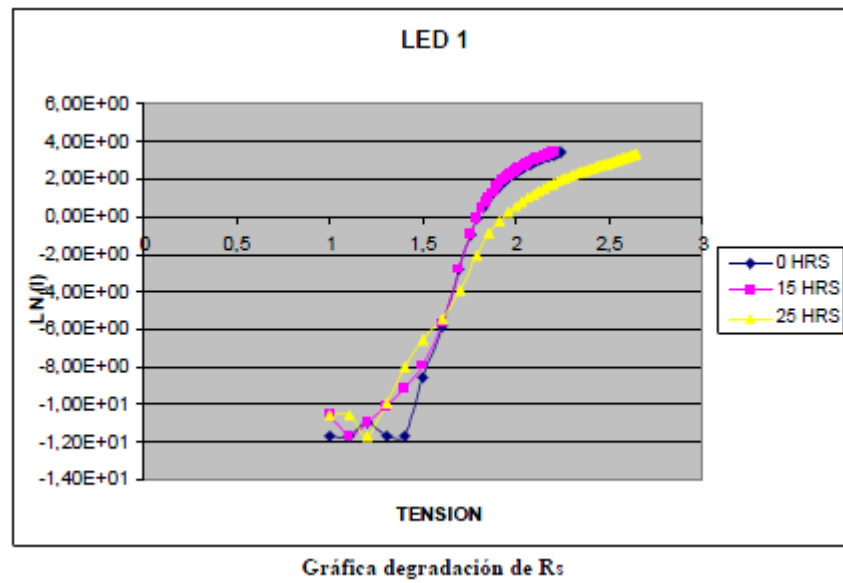
Gráfica de la potencia media del ensayo

### LED 1



Gráfica V-I





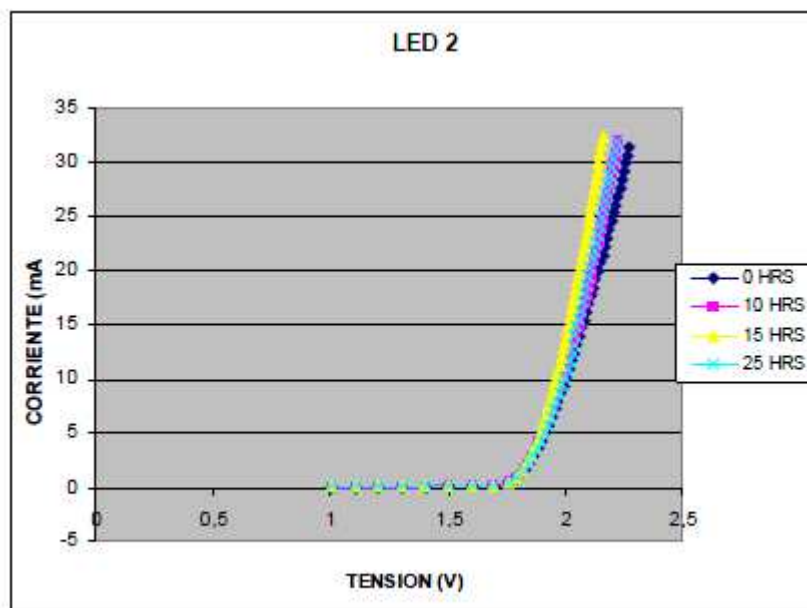
Este diodo presentó fallo a las 25 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



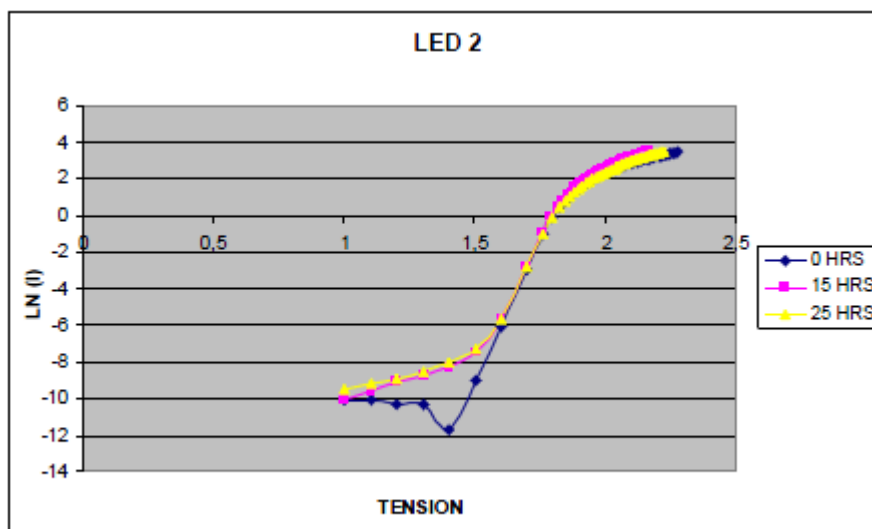
Foto: Ánodo oxidado

Podemos ver una fuerte oxidación del ánodo.

## LED 2



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

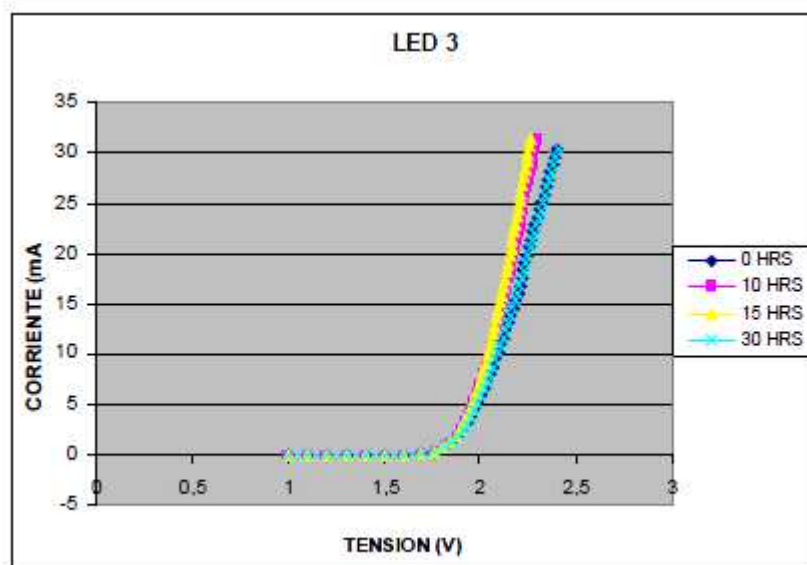
Este diodo presentó fallo a las 25 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



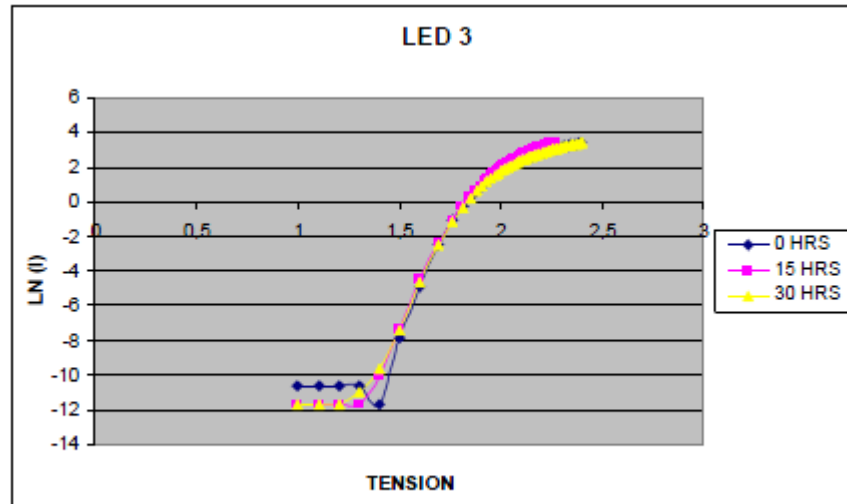
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 3



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

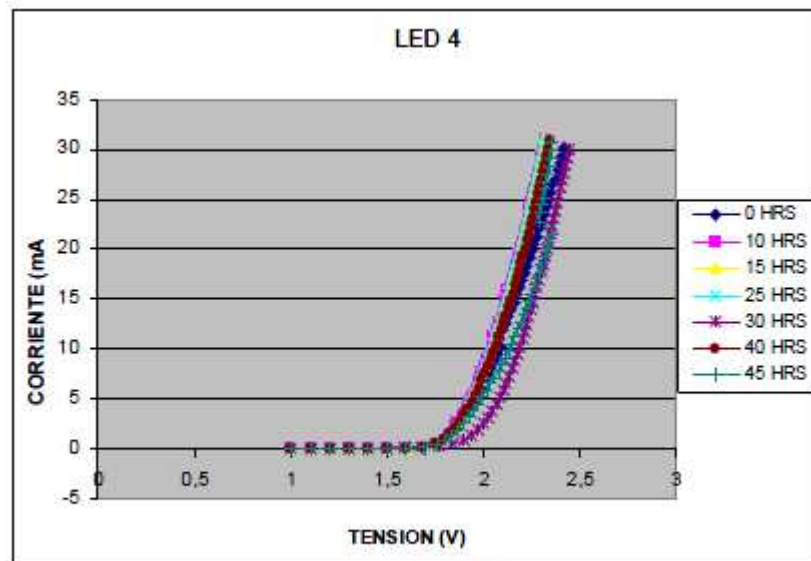
Este diodo presentó fallo a las 35 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.



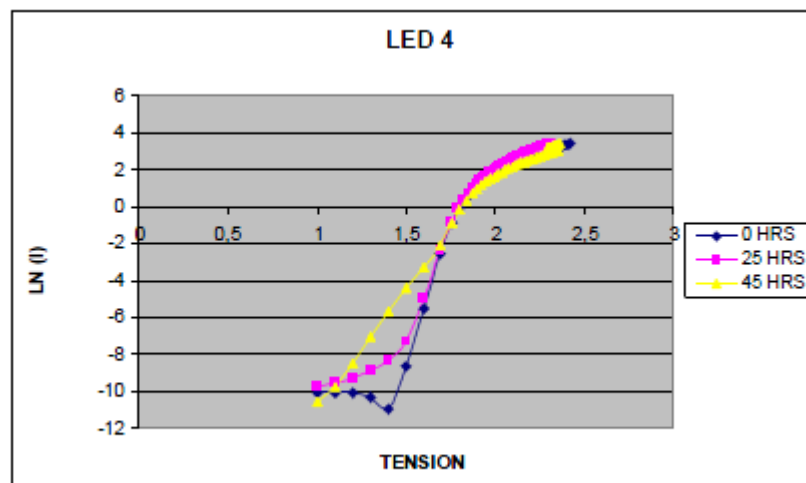
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

## LED 4



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

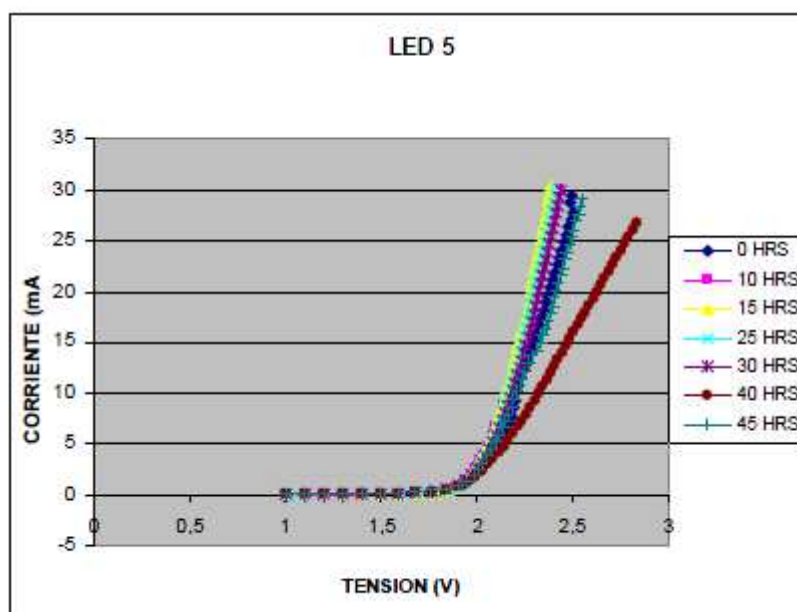
Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



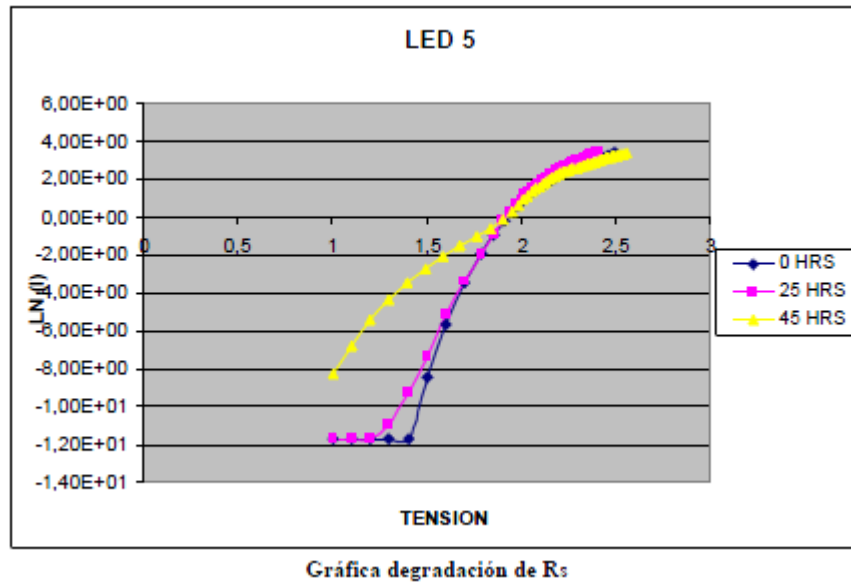
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 5



Gráfica V-I



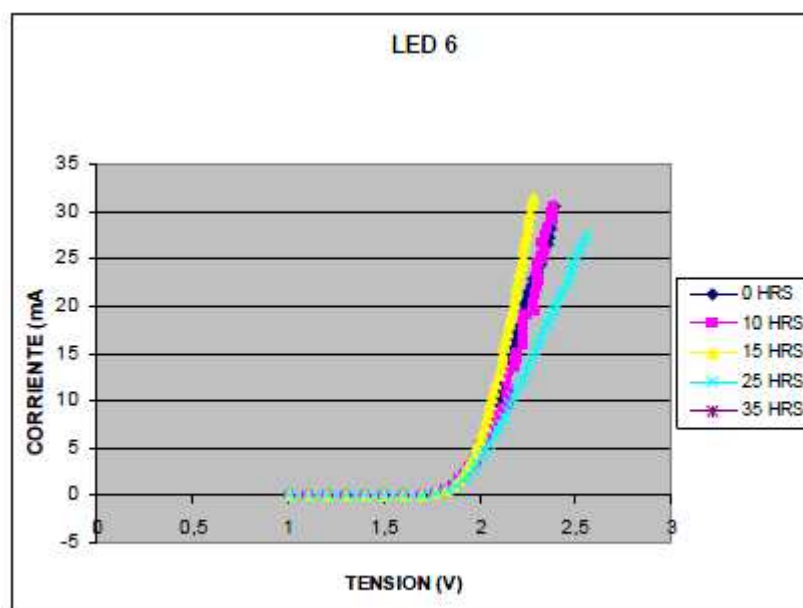
Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.



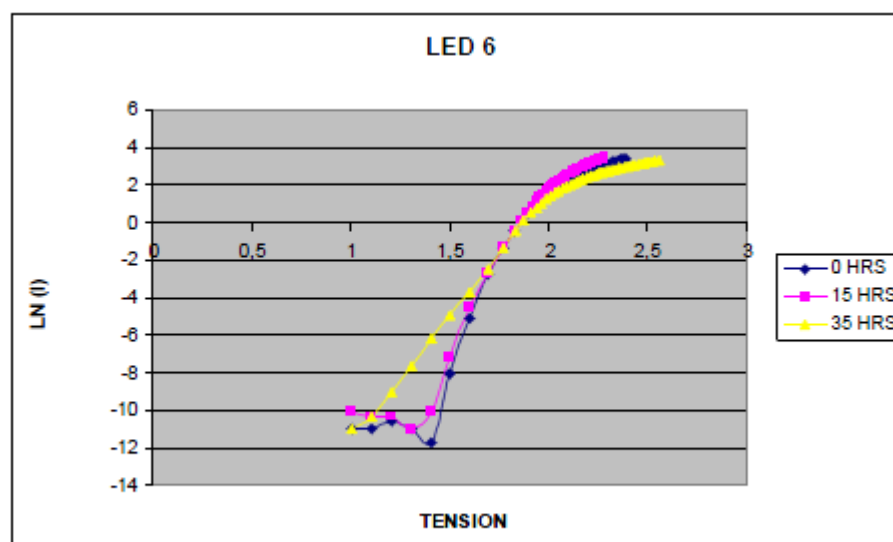
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la fuerte oxidación del ánodo.

## LED 6



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 35 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

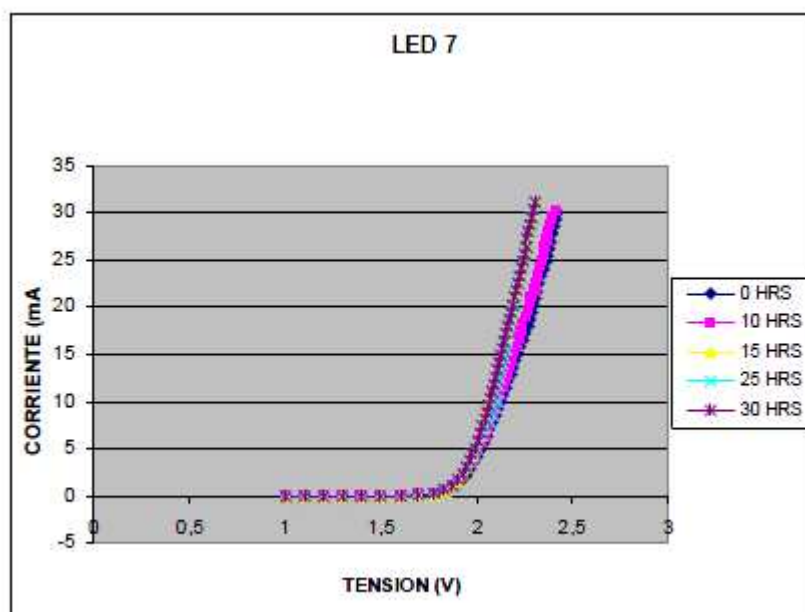




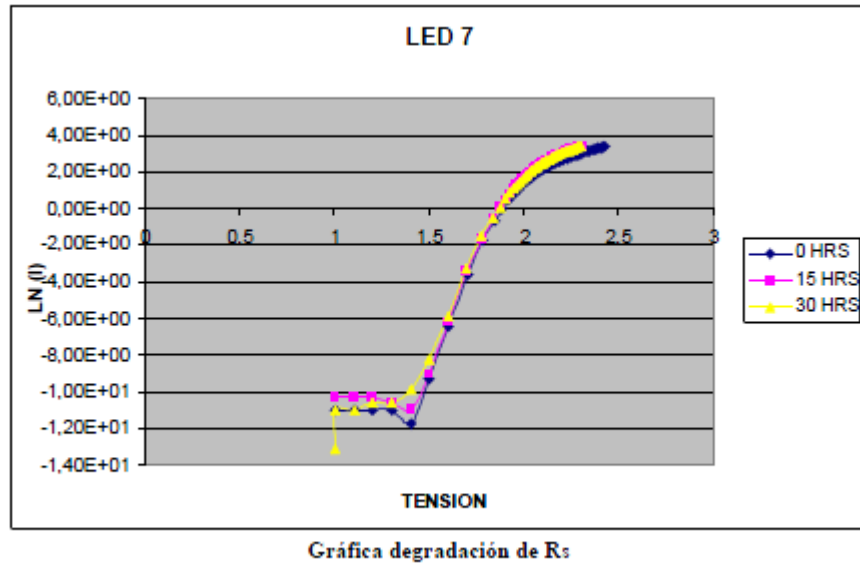
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la fuerte oxidación del ánodo.

### LED 7



Gráfica V-I



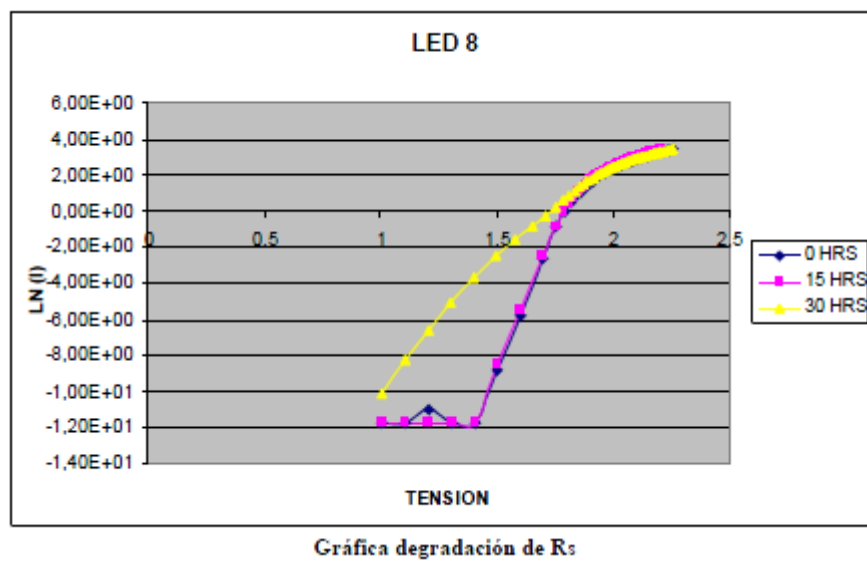
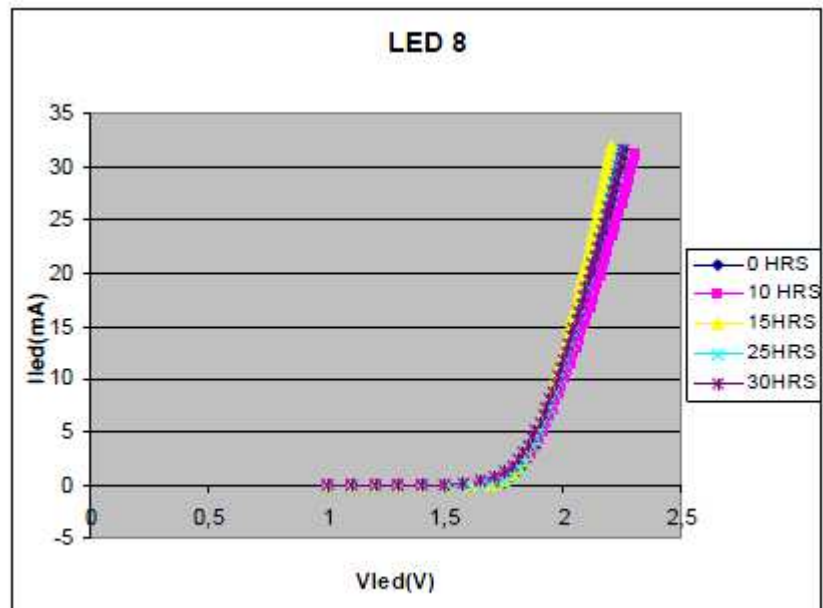
Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 8



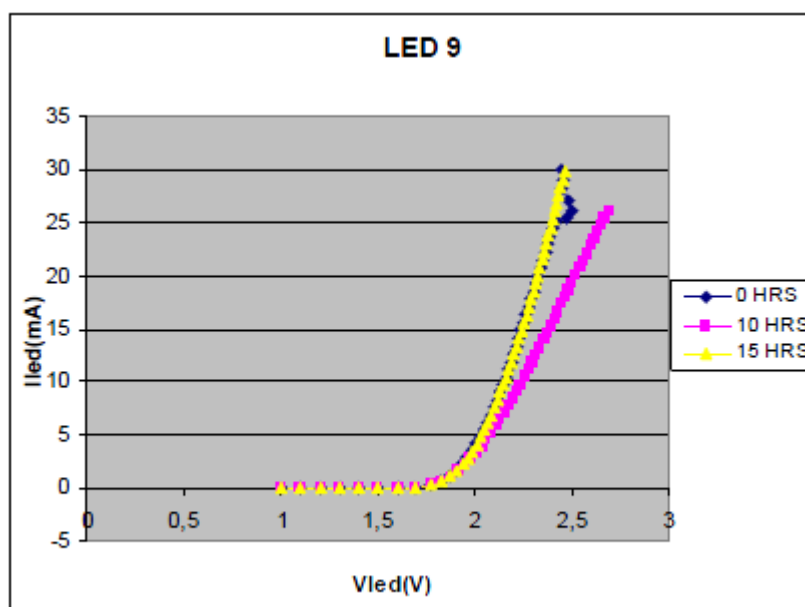
Este diodo presentó fallo a las 30 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



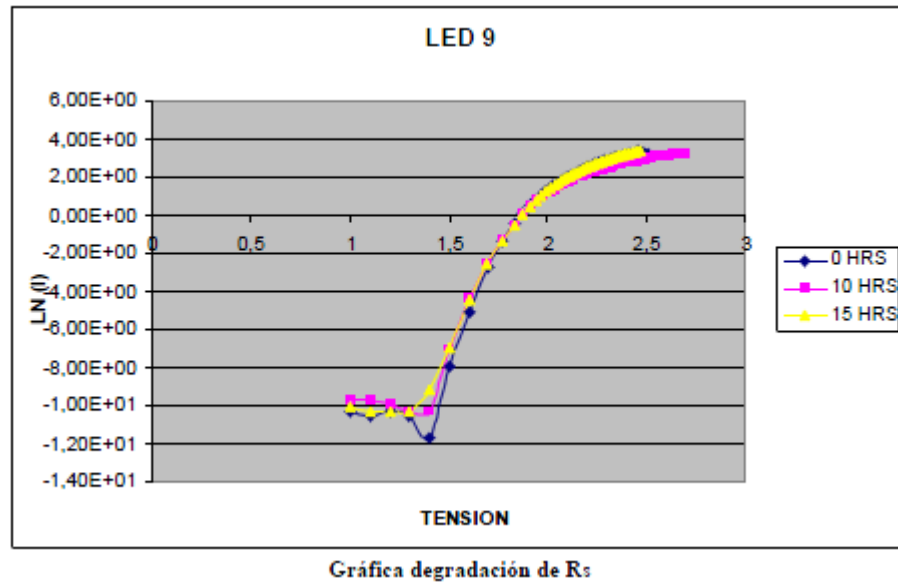
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 9



Gráfica V-I



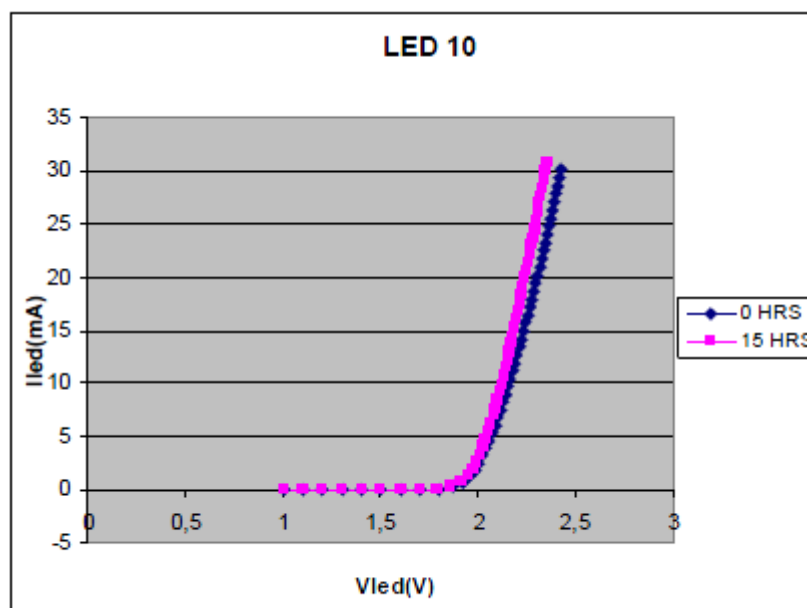
Este diodo presentó fallo a las 15 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada a fuerte degradación de la curva I-V.



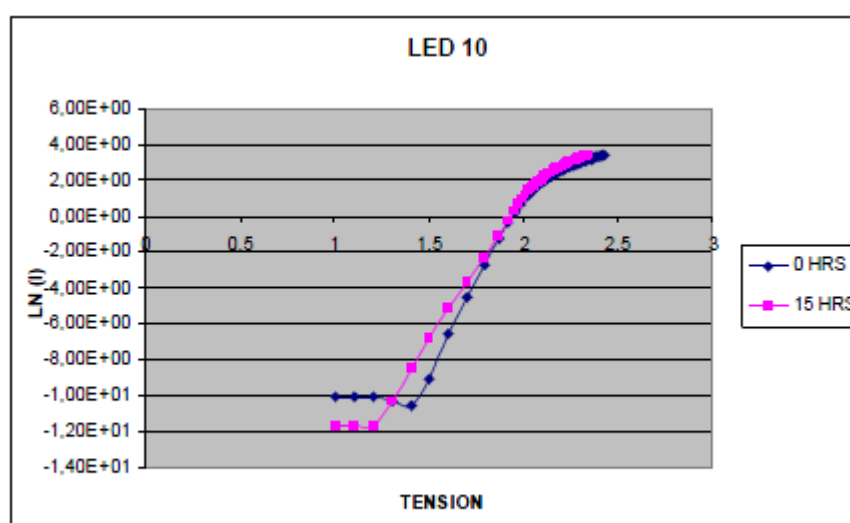
Foto: Anodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

## LED 10



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

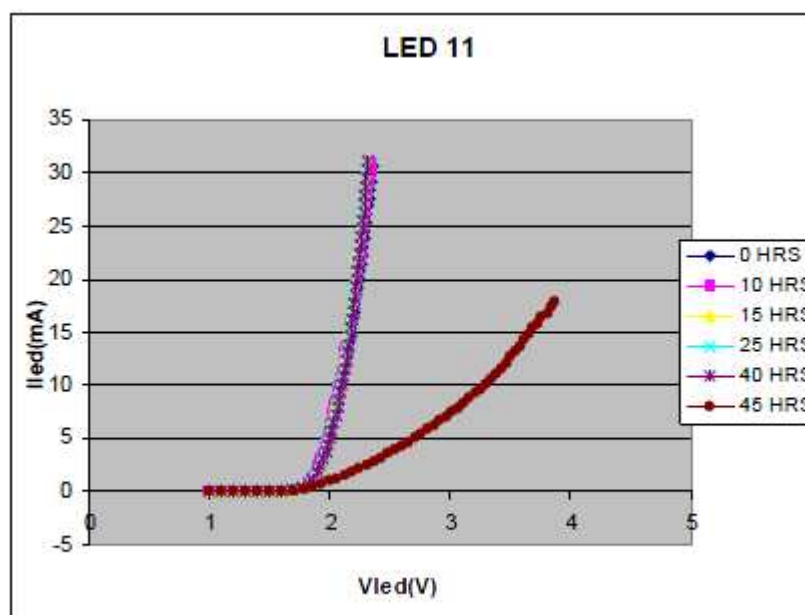
Este diodo presentó fallo a las 15 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



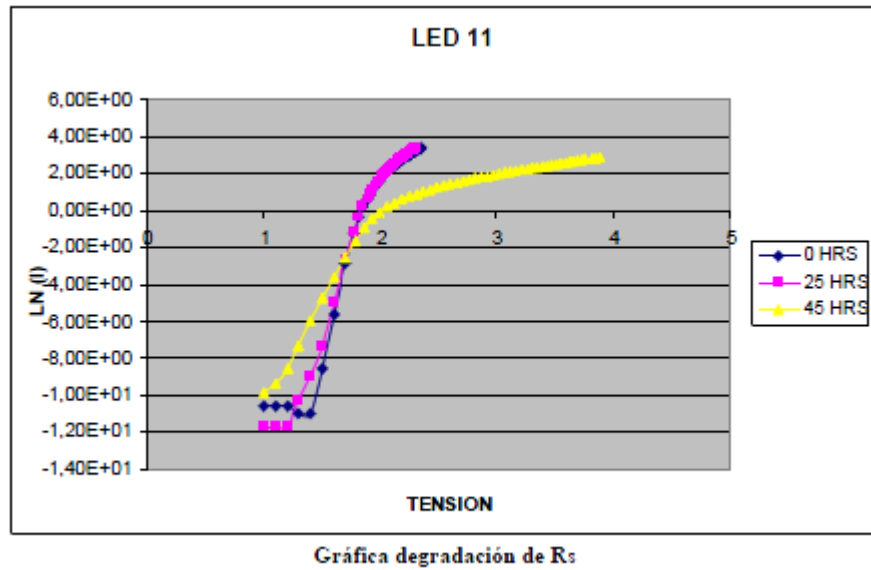
Foto: Anodo con óxido

Podemos ver una fuerte oxidación del ánodo.

### LED 11



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una muy fuerte degradación de la curva I-V.

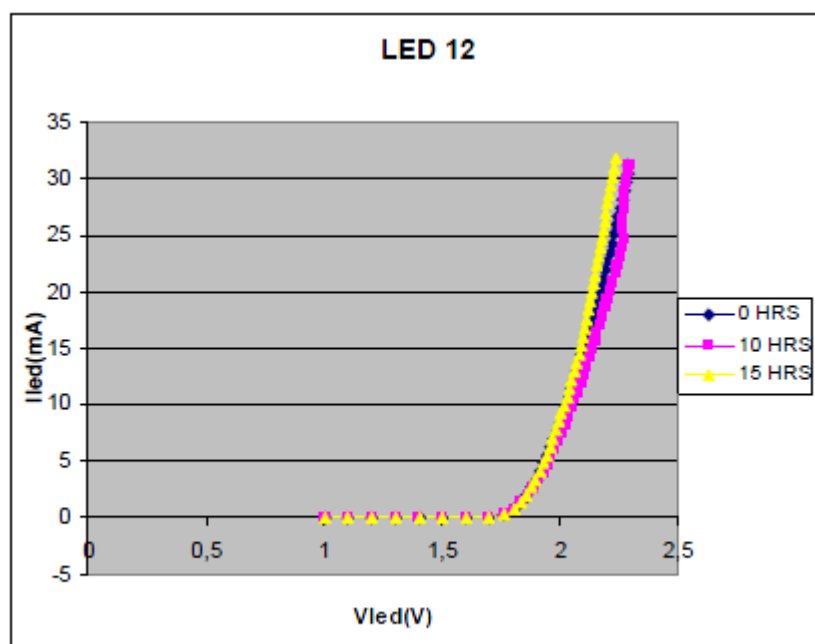


Foto: Ánodo oxidado

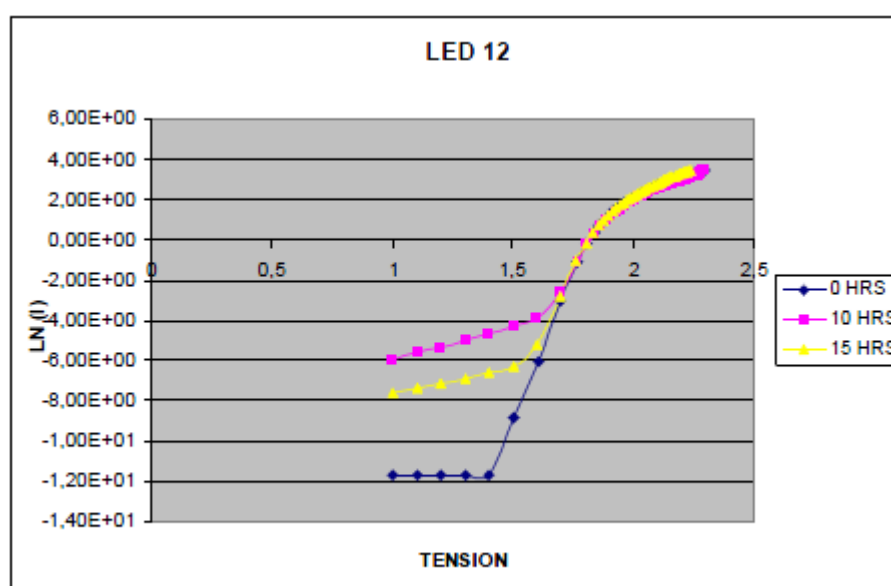
Se observa la oxidación del ánodo.



## LED 12



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

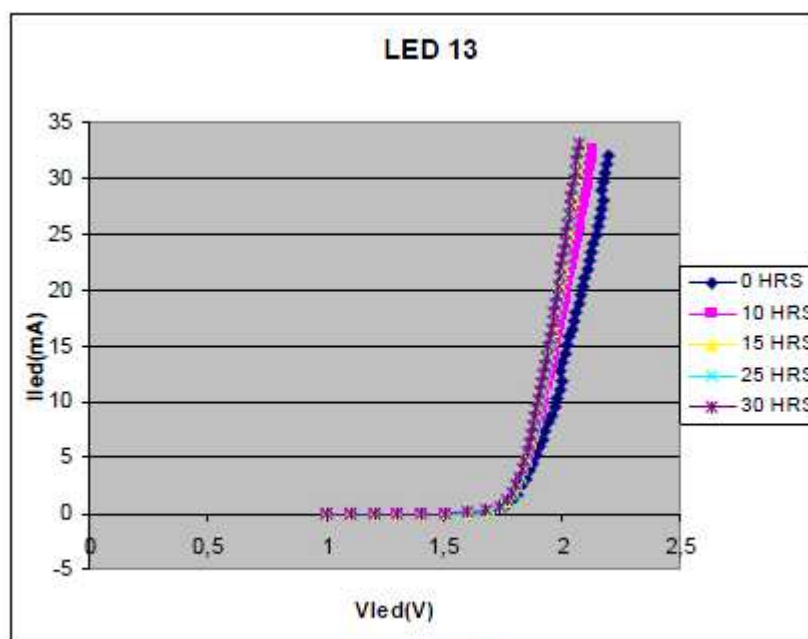
Este diodo presentó fallo a las 15 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



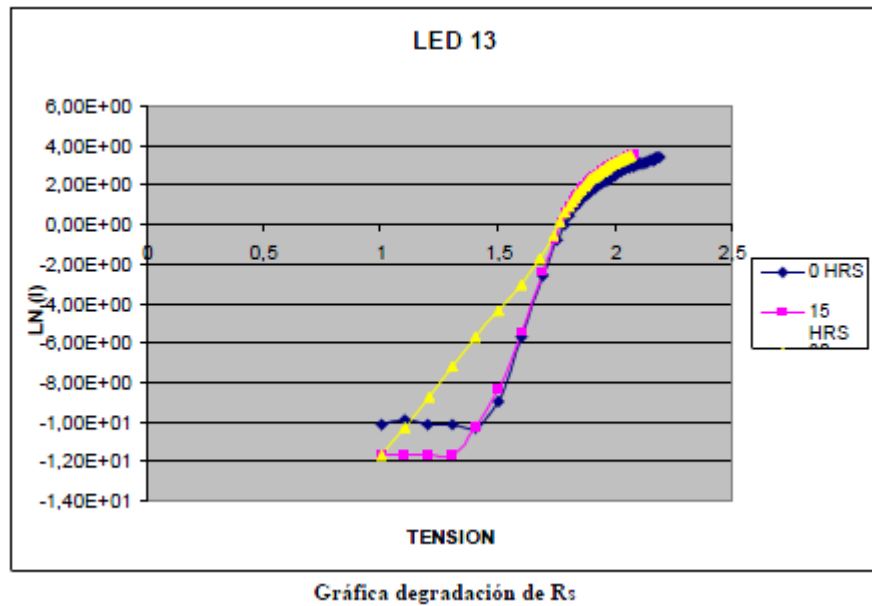
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la ligera oxidación del ánodo.

### LED 13



Gráfica V-I

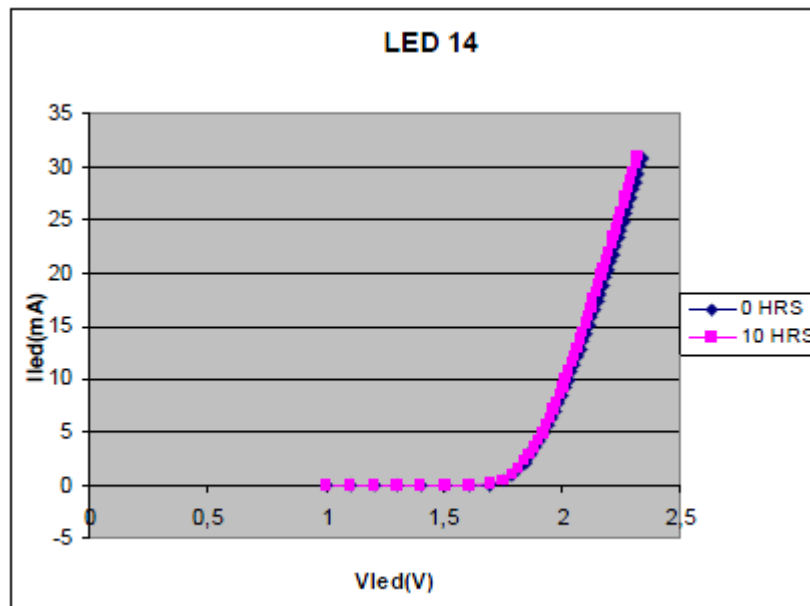


Este diodo presentó fallo a las 30 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

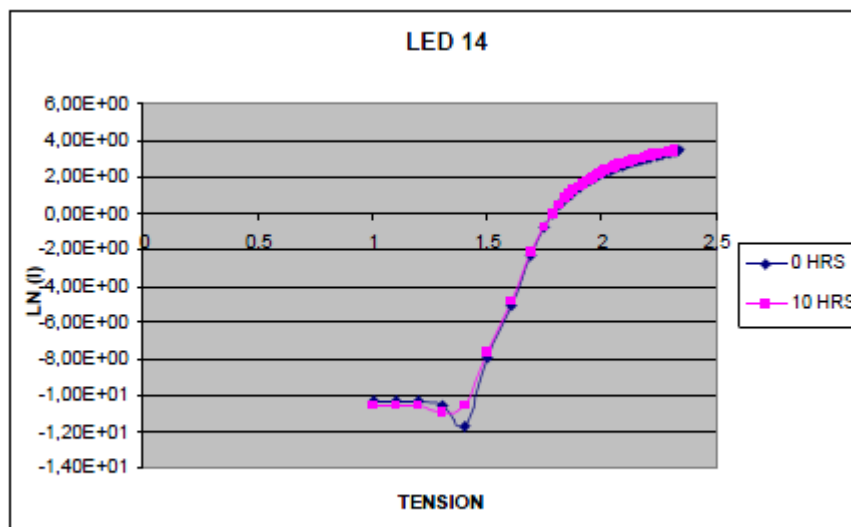


Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

**LED 14**

Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

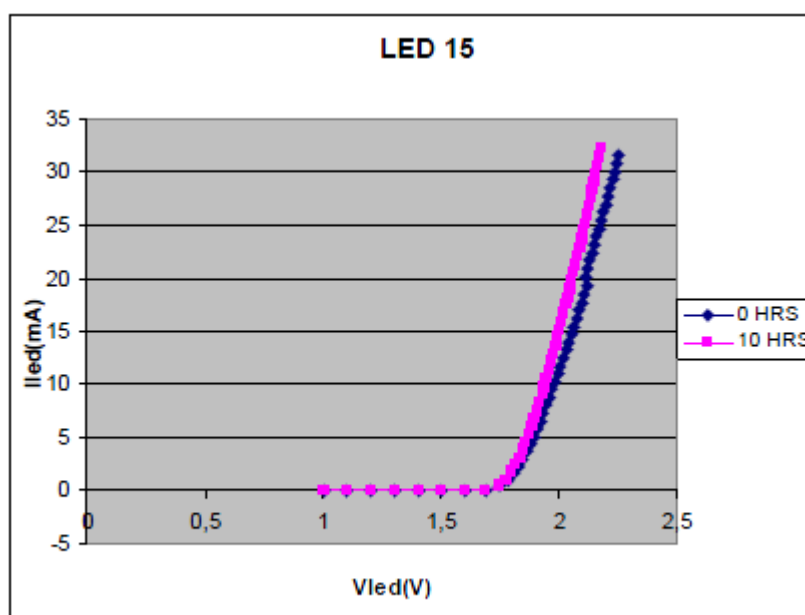
Este diodo presentó fallo a las 10 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.



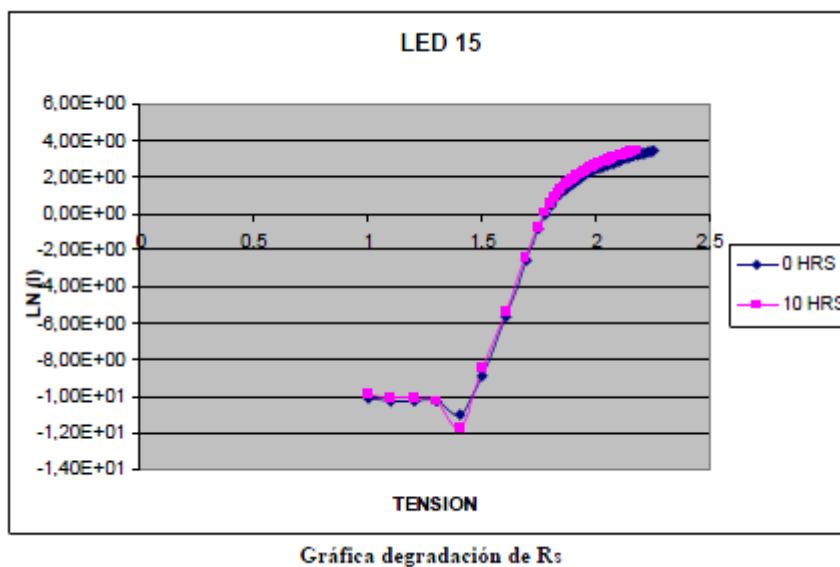
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### LED 15



Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo infantil a las 15 horas por la rotura de la pata del ánodo. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación.

Existe poca degradación de la curva I-V.



Foto: Anodo oxidado



Foto: Cátodo con algo de óxido

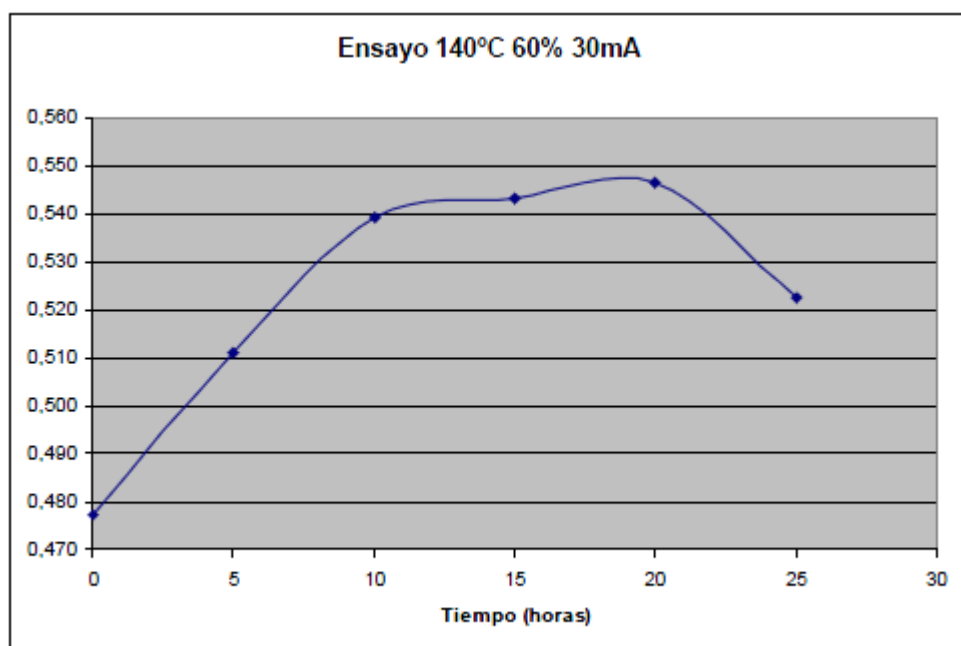
La humedad está presente en ánodo y cátodo en este caso particular.

### 5.3.7 ENSAYO 140 °C Y 60% HUMEDAD RELATIVA A 30mA

Este ensayo ha sido particularmente difícil debido a que la cámara climática presento problemas debido al mal estado de la junta de goma aislante que sella la zona de ensayo dentro de la cámara de las condiciones exteriores. Por este motivo, cabe la posibilidad de que los datos arrojados en este ensayo no sean del todo reales. Sea como sea, la curiosidad del ensayo es que se puede observar claramente un comportamiento ya previsto después de observar el resto de los ensayos anteriores, y es que los diodos no presentan un nivel de penetración de humedad muy alto, esto es porque las condiciones de humedad relativa son más bajas.

No se presentaron fallos infantiles en ninguno de los LED. Además, algunos LED no llegaron a presentar fallo al final del ensayo. La duración total fue de 85 horas.

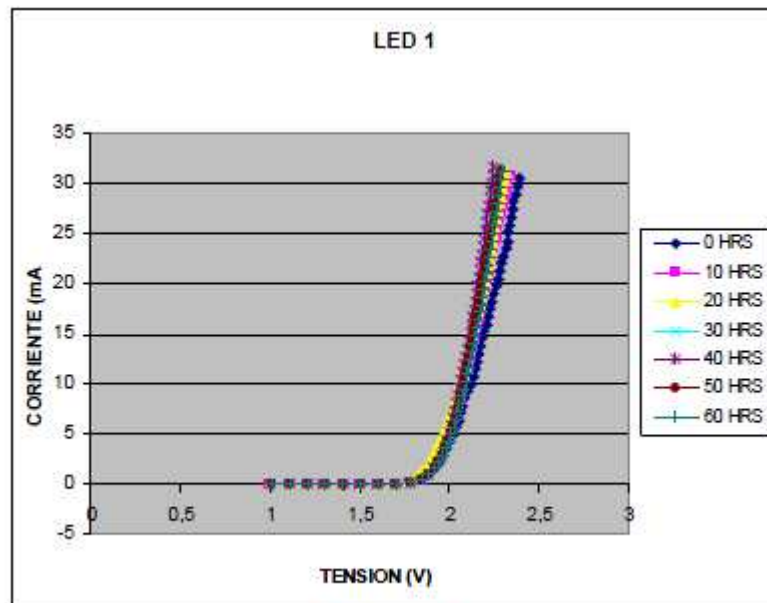
Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 25 horas debido a que los resultados a partir de las 30 horas no arrojan datos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



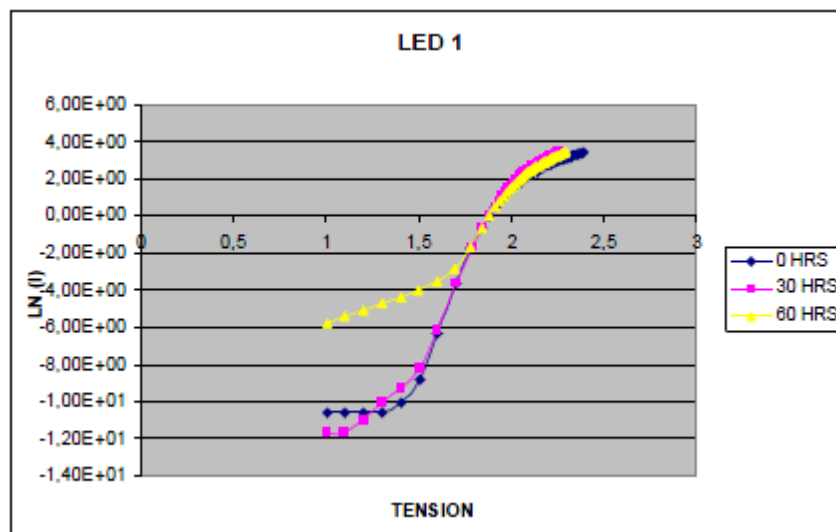
Gráfica de la potencia media del ensayo



## LED 1



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

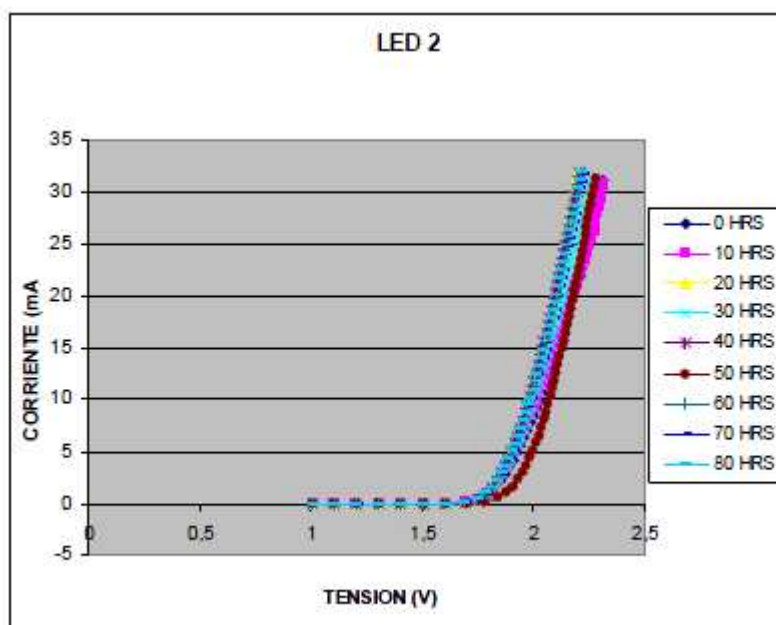
Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



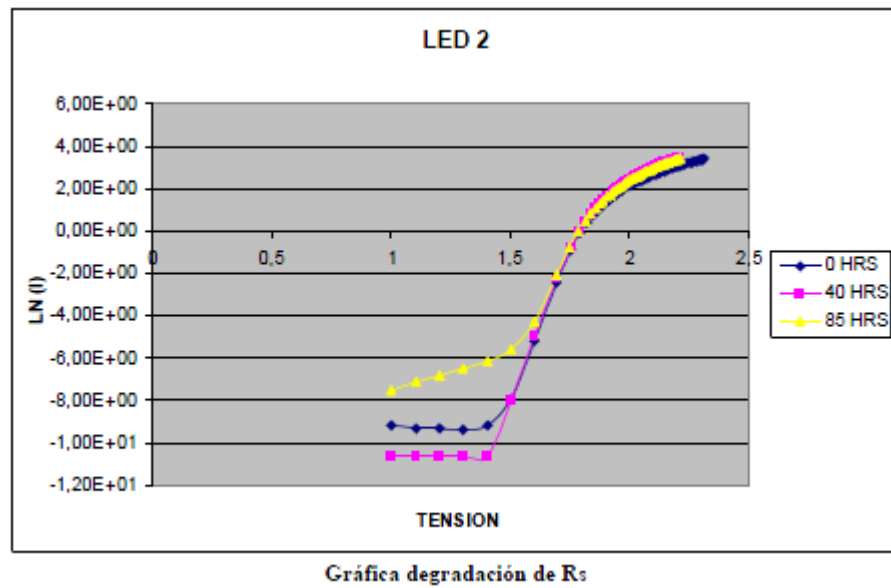
Foto: Anodo poco oxidado

En este diodo la oxidación no fue muy acentuada.

## LED 2



Gráfica V-I



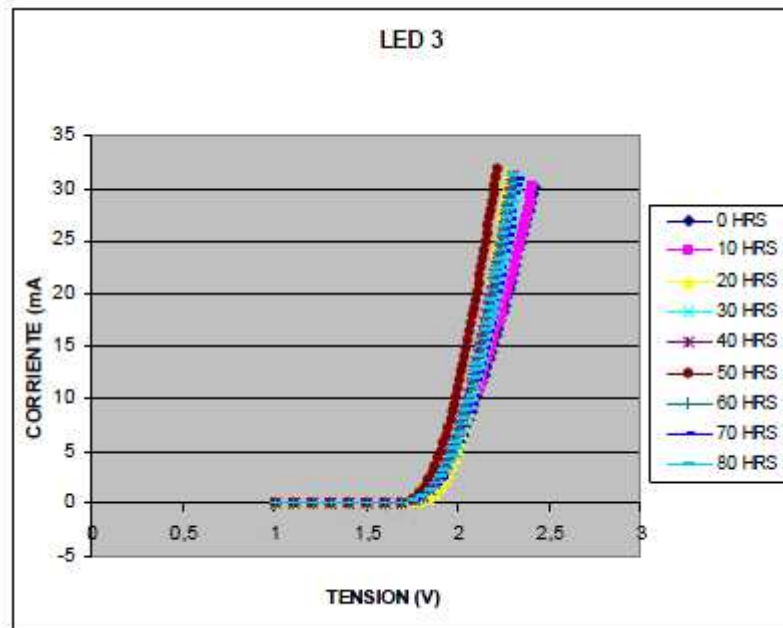
Este diodo presentó fallo a las 80 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



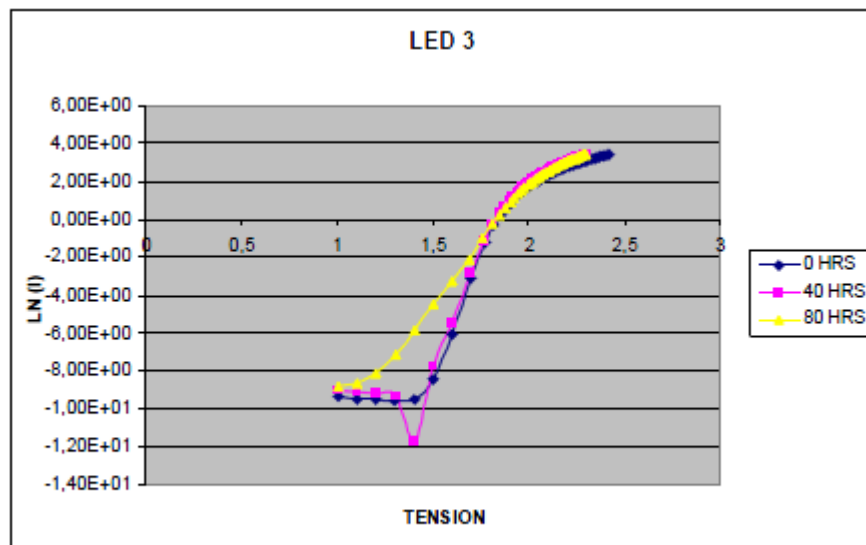
Foto: Anodo poco oxidado

En este diodo no hubo mucha oxidación.

## LED 3



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

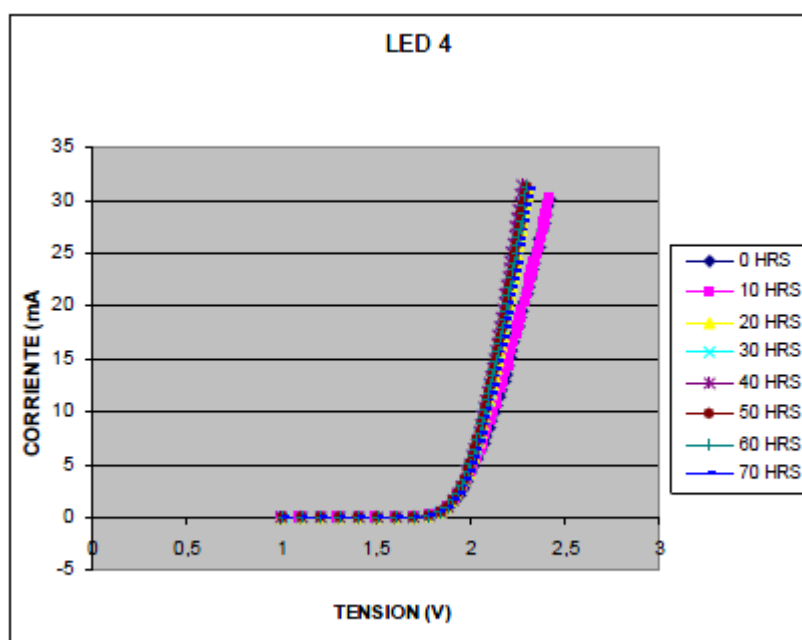
Este diodo presentó fallo a las 80 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



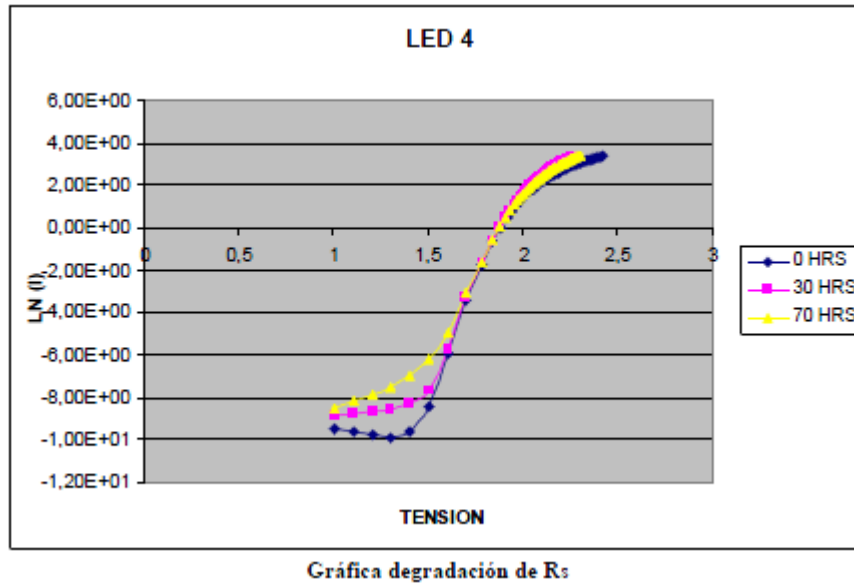
Foto: Ánodo oxidado

En este caso sí que hay óxido en el ánodo.

#### LED 4



Gráfica V-I



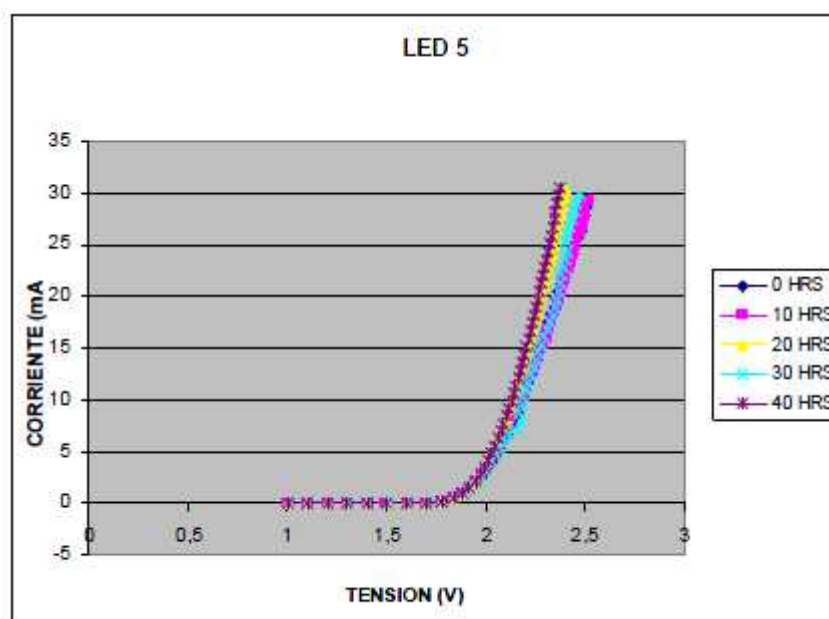
Este diodo presentó fallo a las 70 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



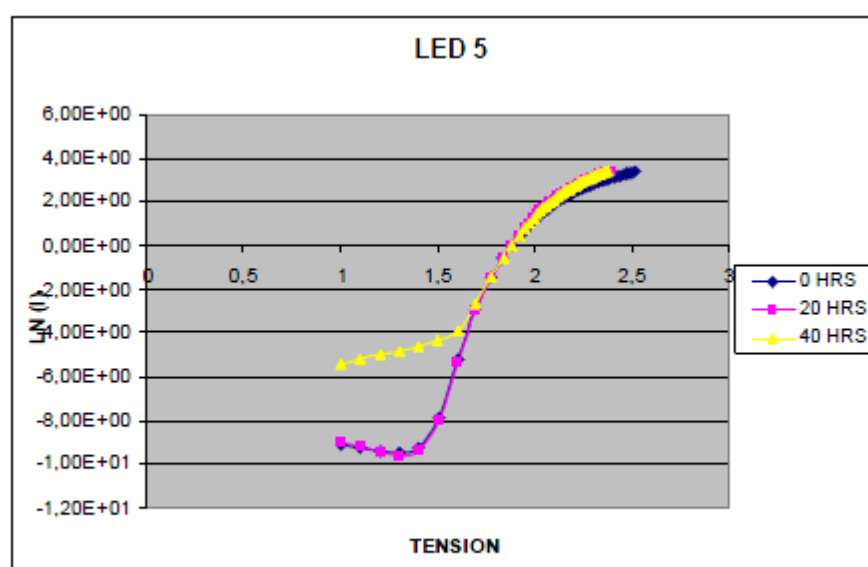
Foto: Anodo poco oxidado

Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

## LED 5



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

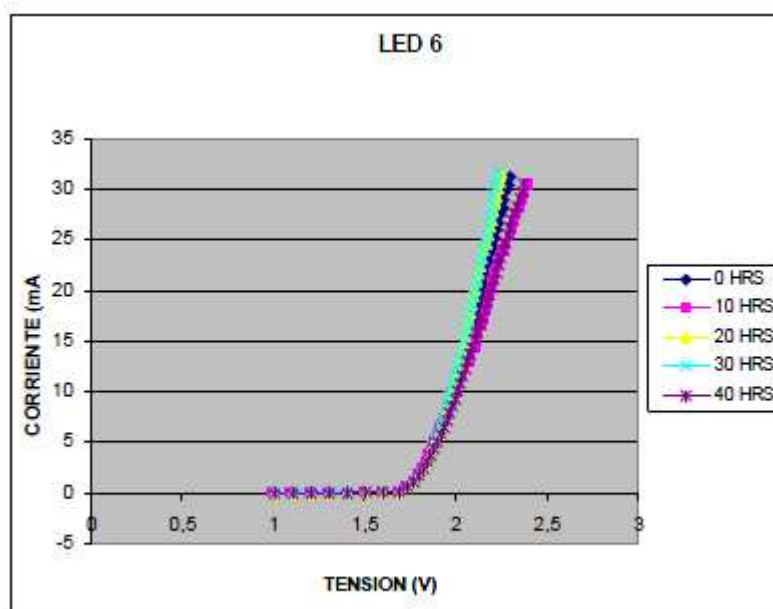
Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



Foto: Anodo poco oxidado

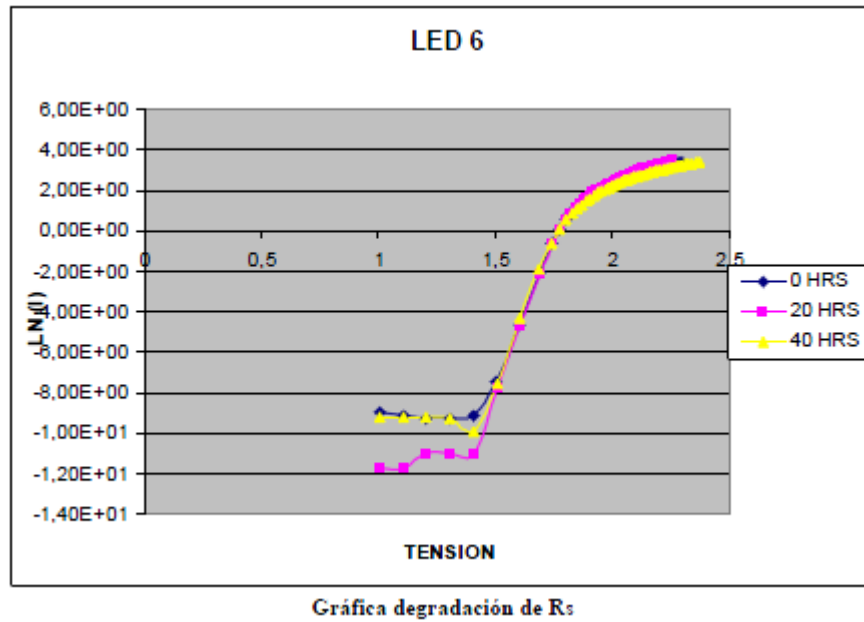
Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

### LED 6



Gráfica V-I





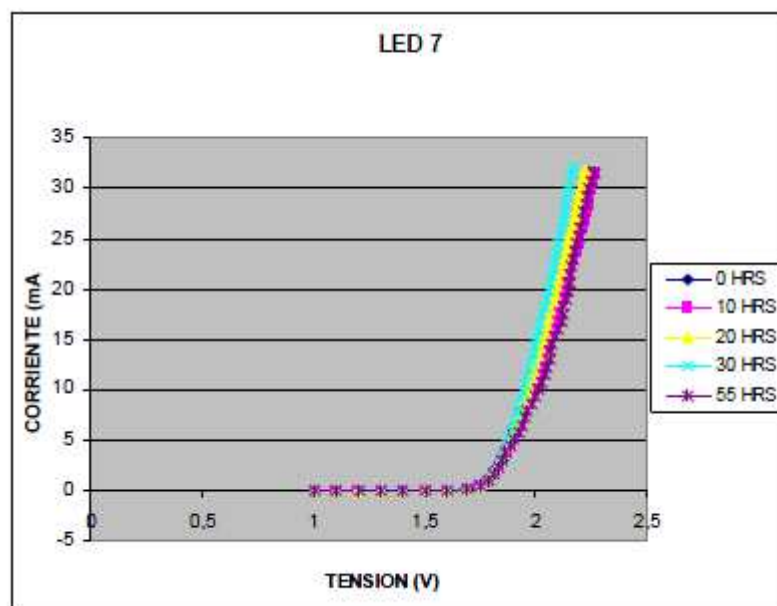
Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



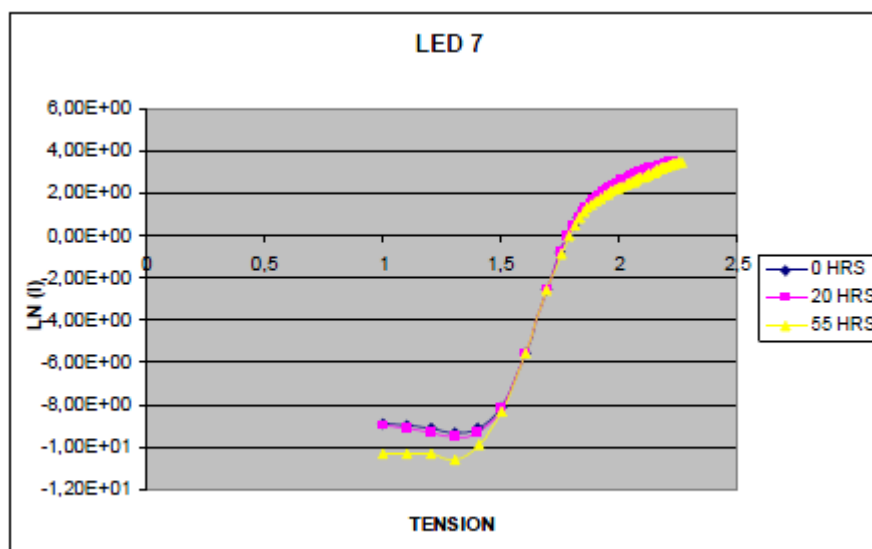
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 7



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

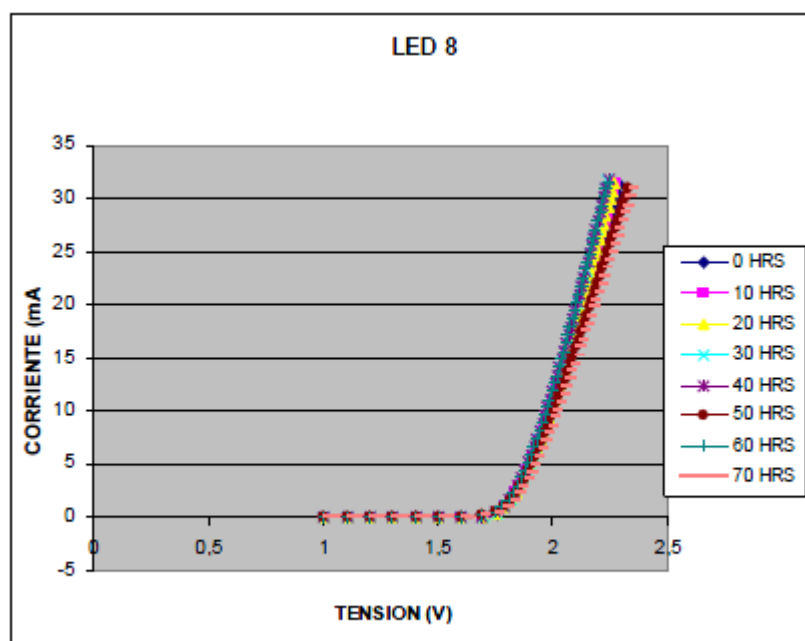
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



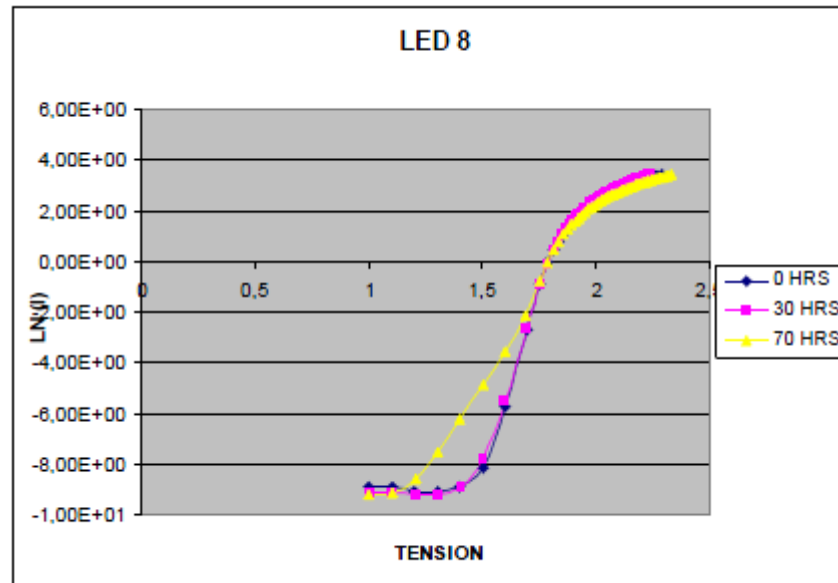
Foto: Anodo con apenas óxido

Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

### LED 8



Gráfica V-I



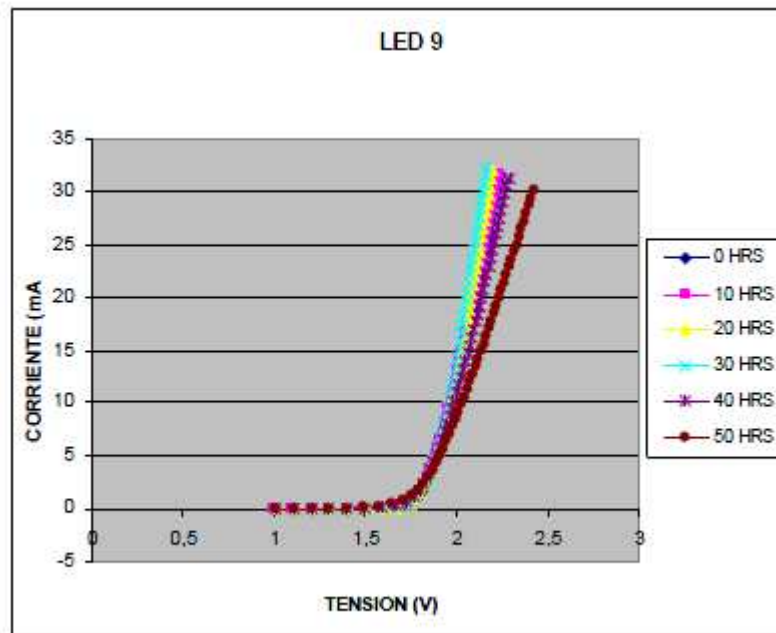
Este diodo presentó fallo a las 70 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



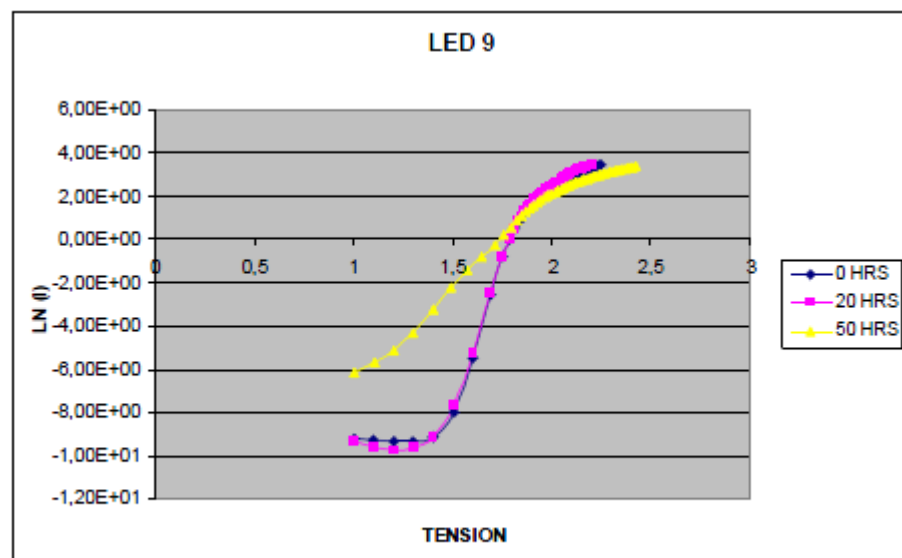
Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 9



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

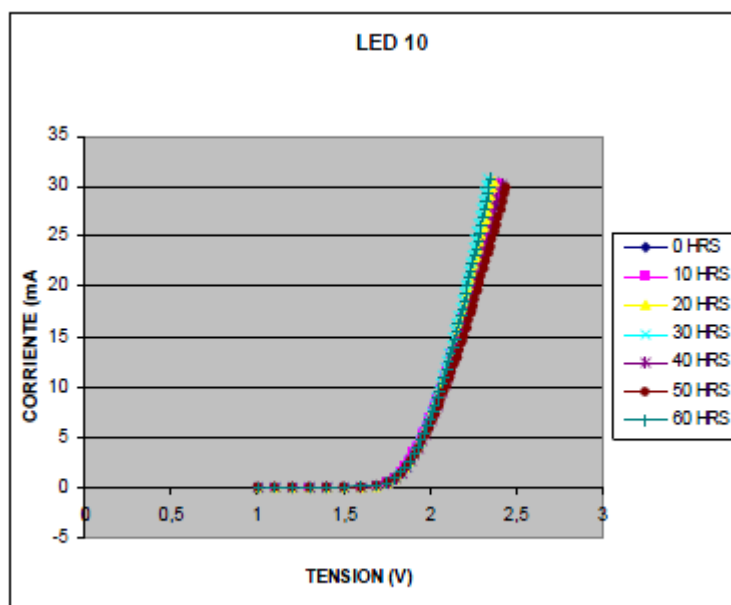
Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



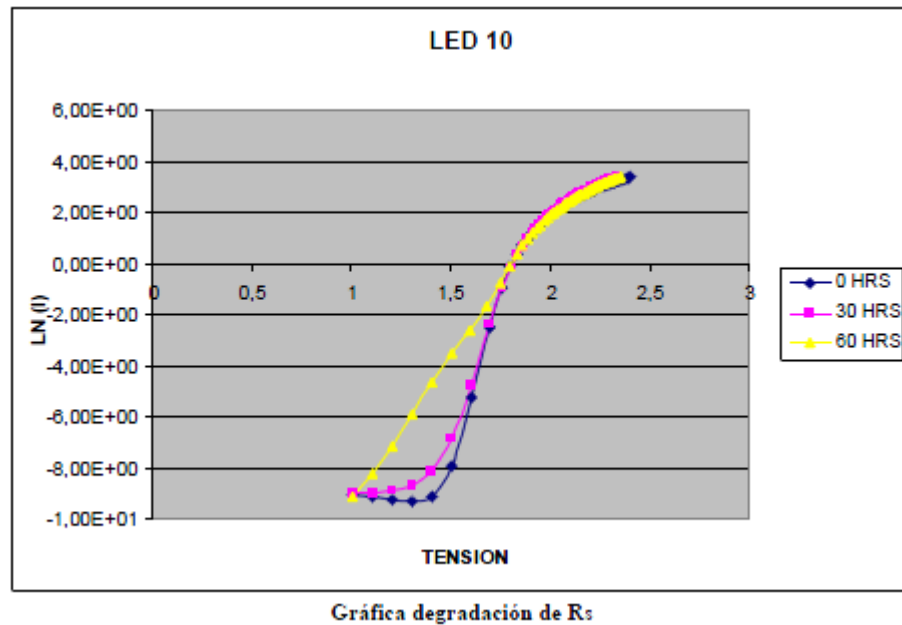
Foto: Anodo poco oxidado

Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

## LED 10



Gráfica V-I



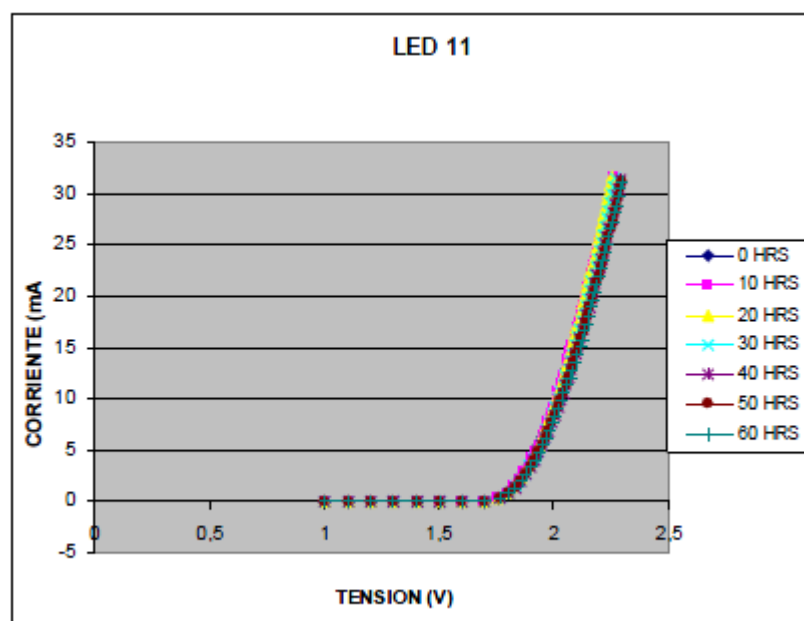
Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



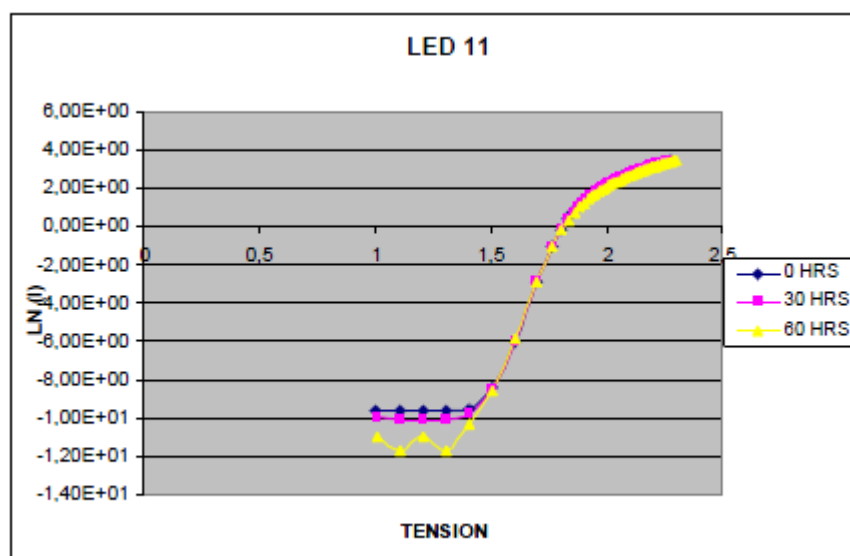
Foto: Anodo con apenas óxido

Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

## LED 11



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

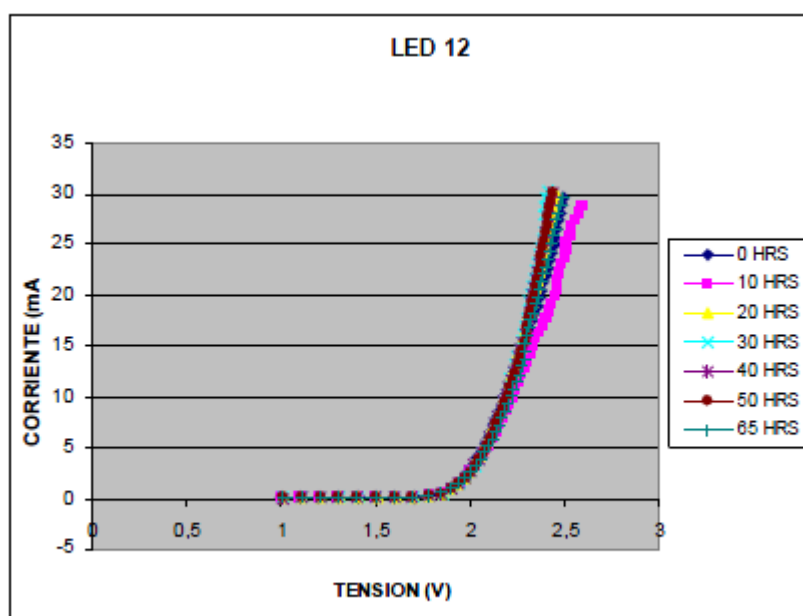




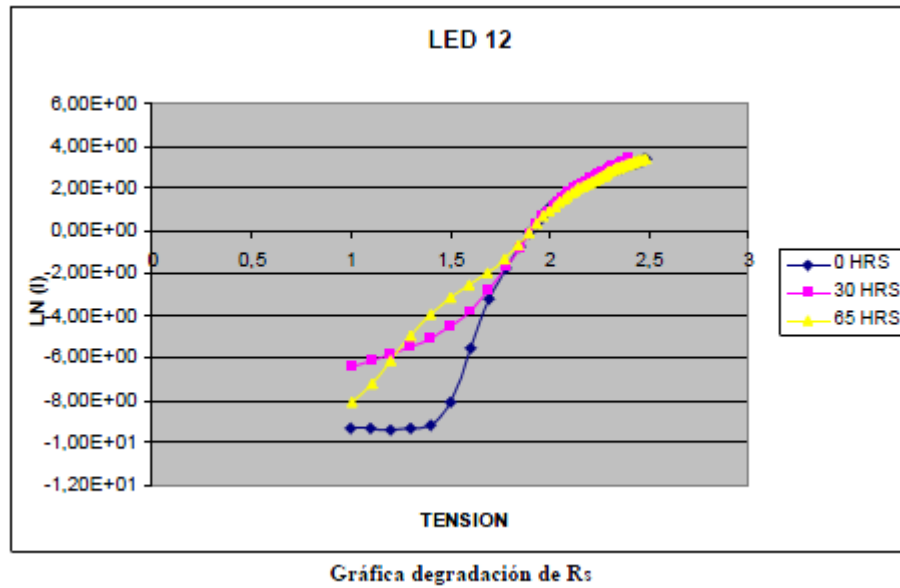
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 12



Gráfica V-I



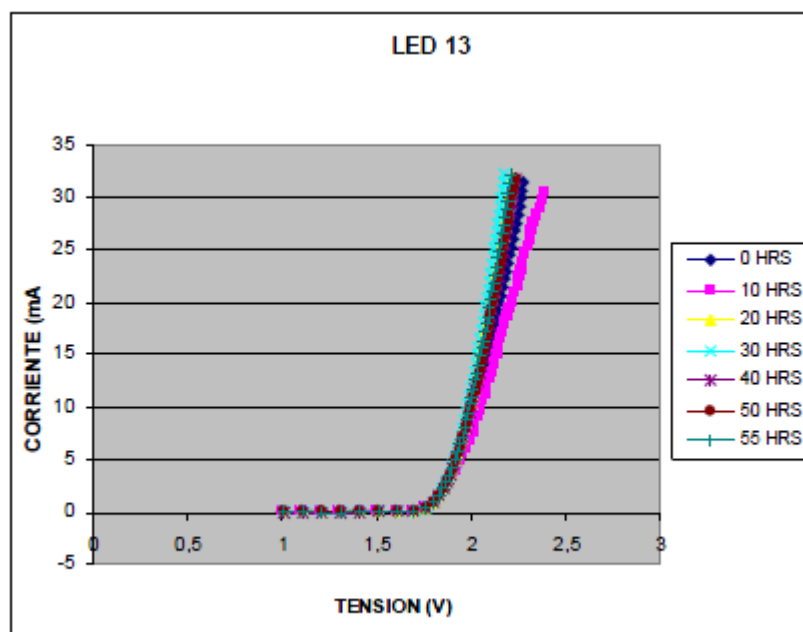
Este diodo presentó fallo a las 65 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.



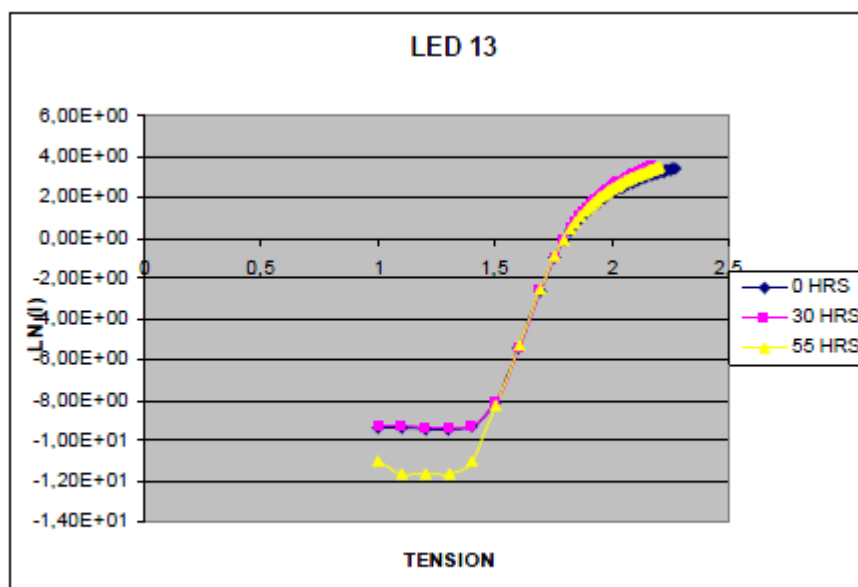
Foto: Anodo con apenas óxido

Este diodo tampoco presentó mucha oxidación.

## LED 13



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

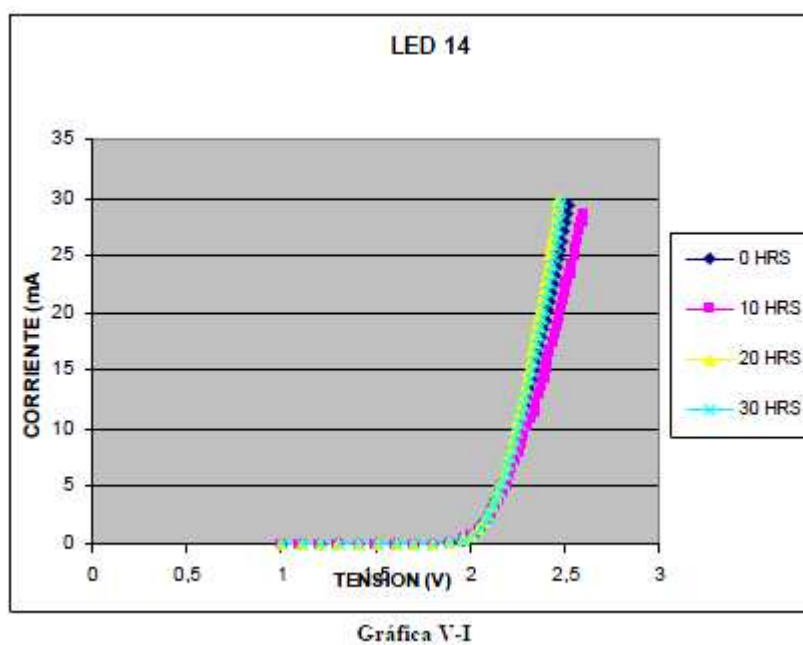
Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

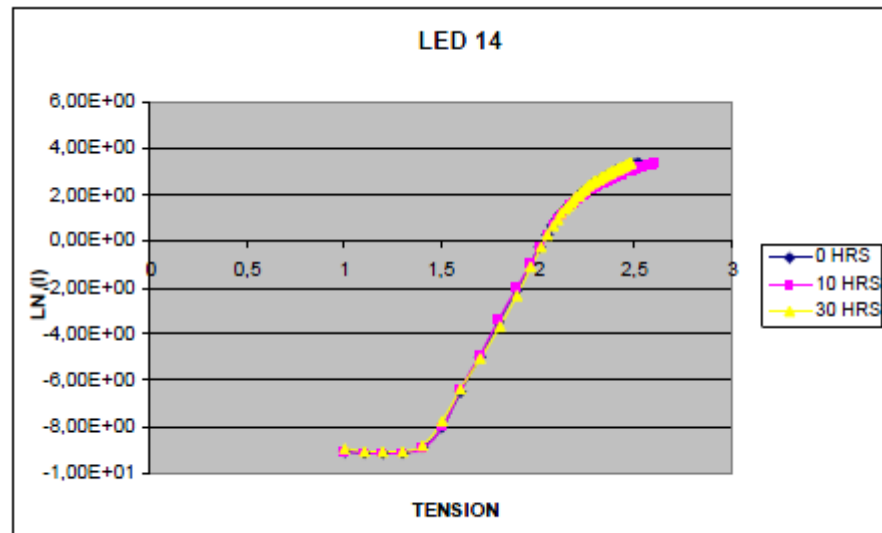


Foto: Ánodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

#### LED 14





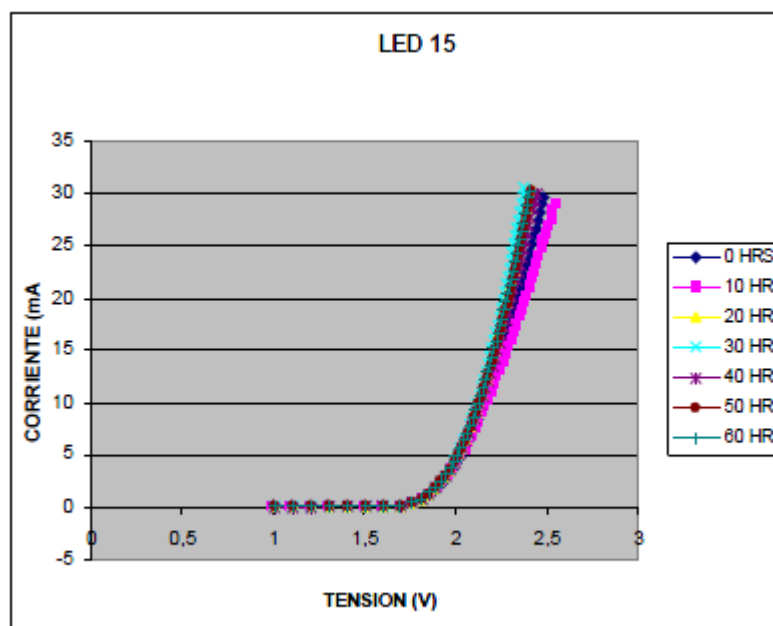
Este diodo presentó fallo a las 30 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera a moderada degradación de la curva I-V.



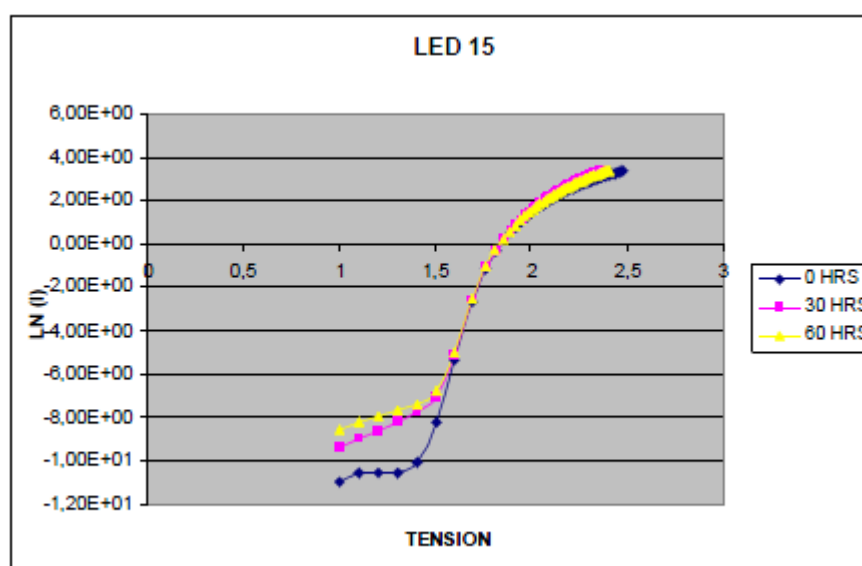
**Foto: Ánodo oxidado**

Se observa la oxidación del ánodo.

## LED 15



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 60 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 20 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



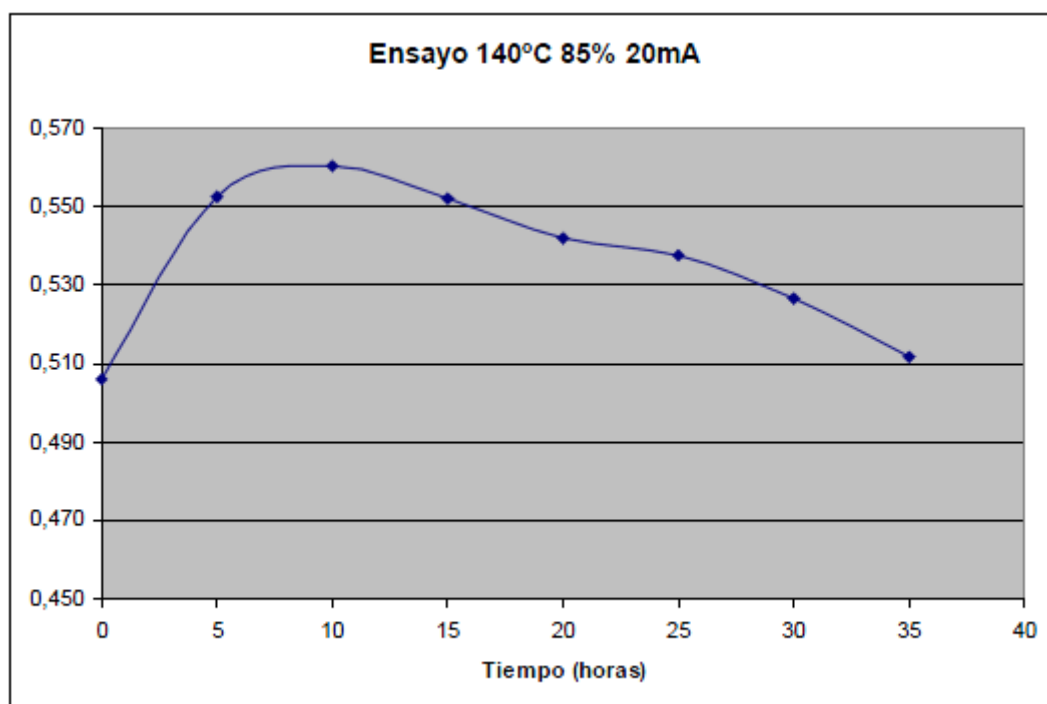
Foto: Anodo oxidado

Se observa la oxidación del ánodo.

### 5.3.8 ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 20mA

En este último ensayo hubo un problema con las muestras a posteriori, no disponemos de fotos con la cámara por el extravío de las muestras del ensayo. Lo más destacable es que varios LED no presentaron fallo. La duración total del ensayo fue de 55 horas.

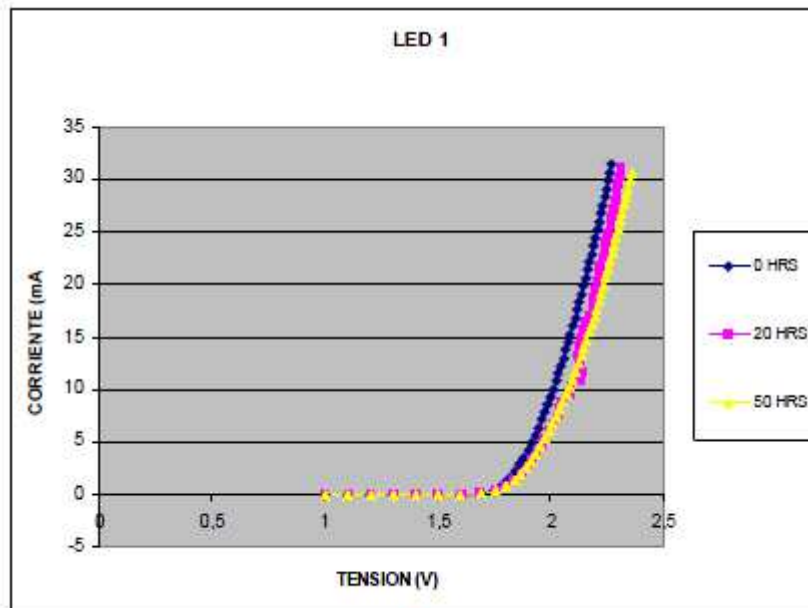
Aquí se muestra una gráfica resumen con las potencias en función del tiempo del ensayo. Vamos a representar sólo las medidas hasta las 35 horas debido a que los resultados a partir de las 55 horas no arrojan datos gráficos concluyentes, debido a la aparición de fallos en los LED.



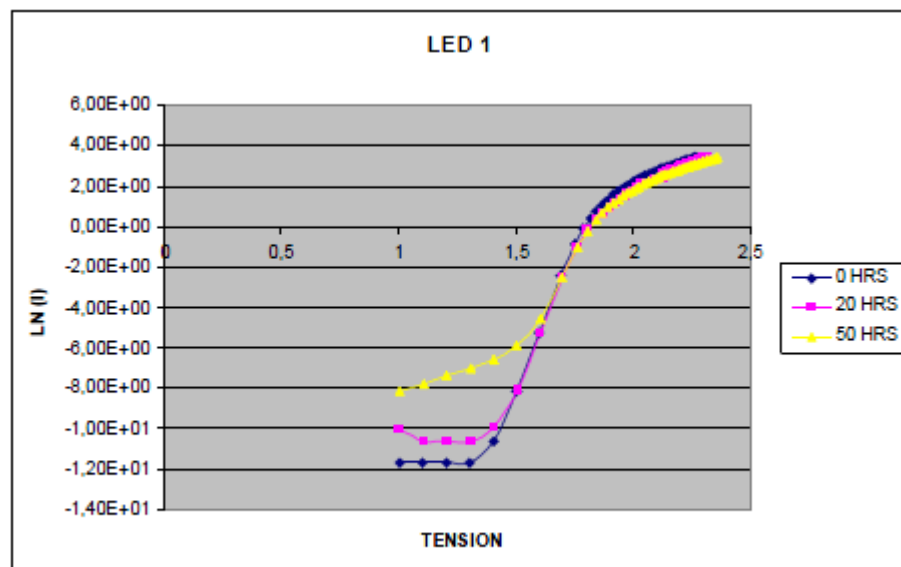
Gráfica de la potencia media del ensayo



## LED 1

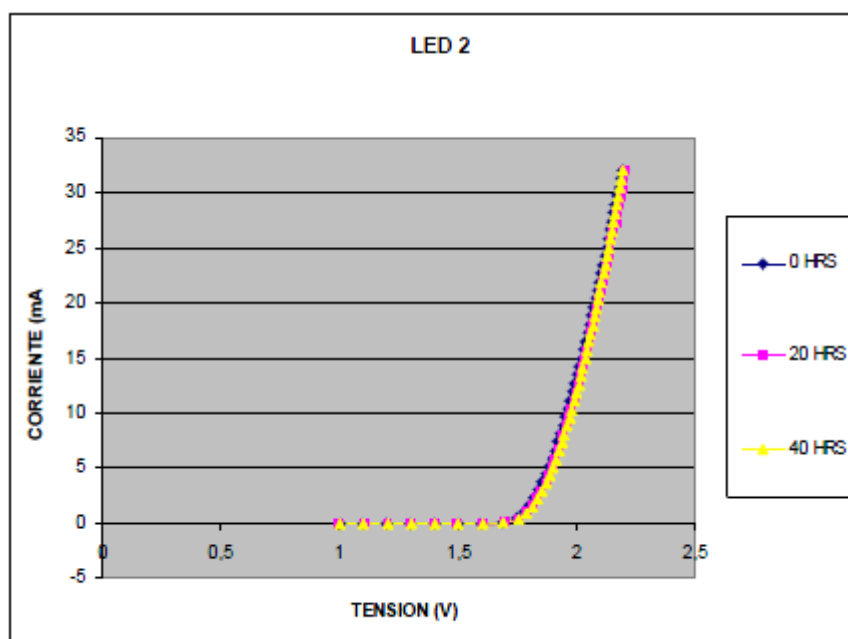


Gráfica V-I

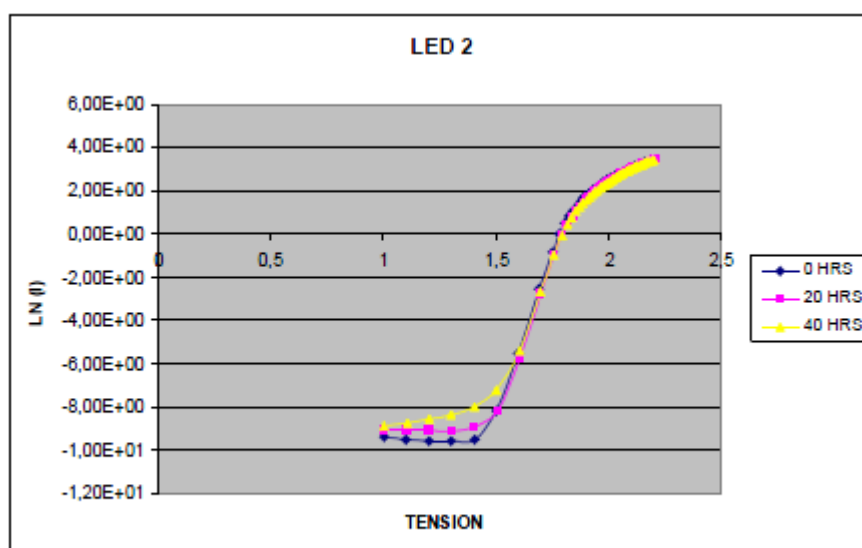
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 55 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una moderada degradación de la curva I-V.

## LED 2

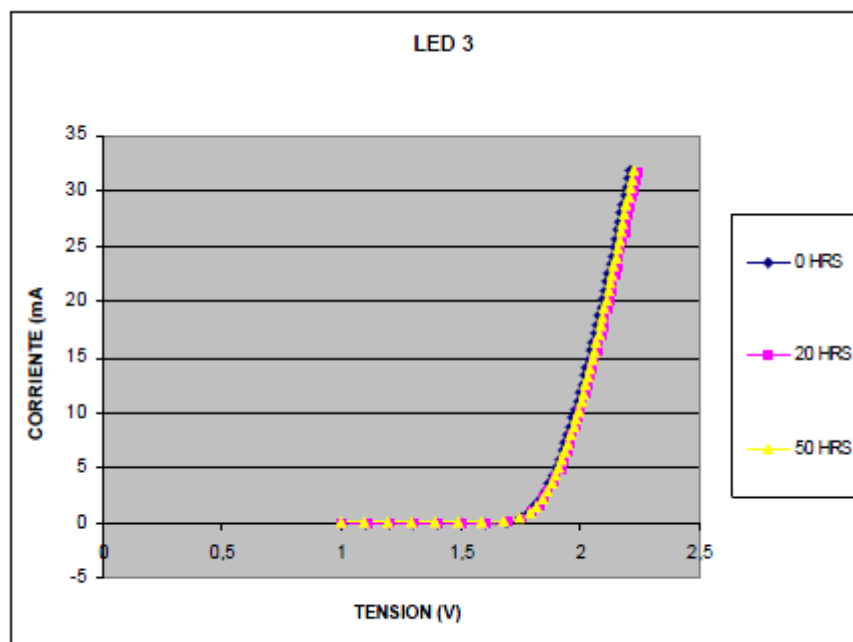


Gráfica V-I

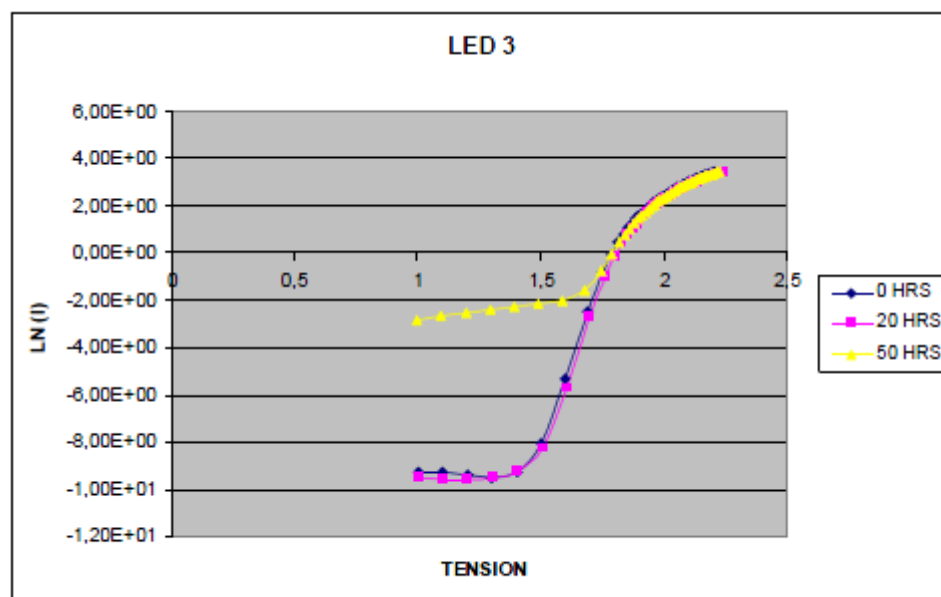
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 40 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

## LED 3

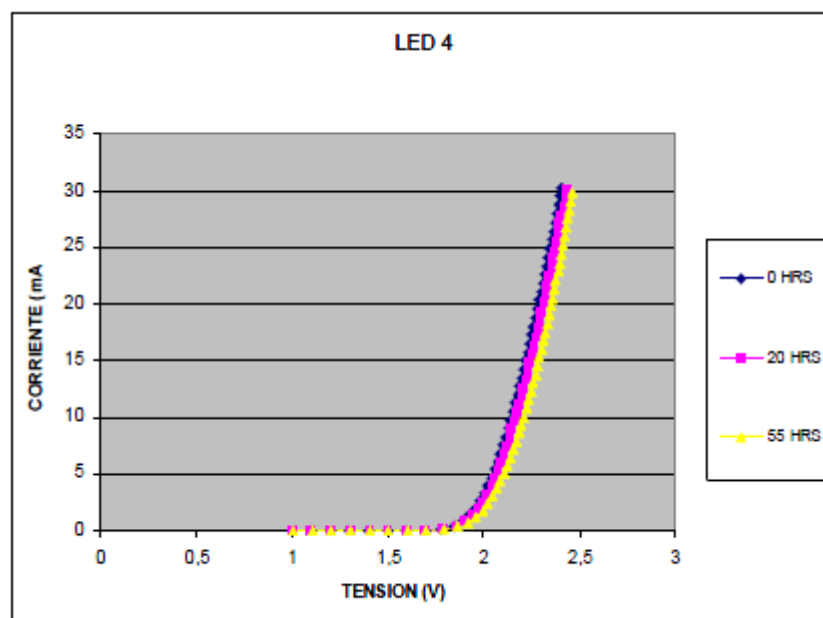


Gráfica V-I

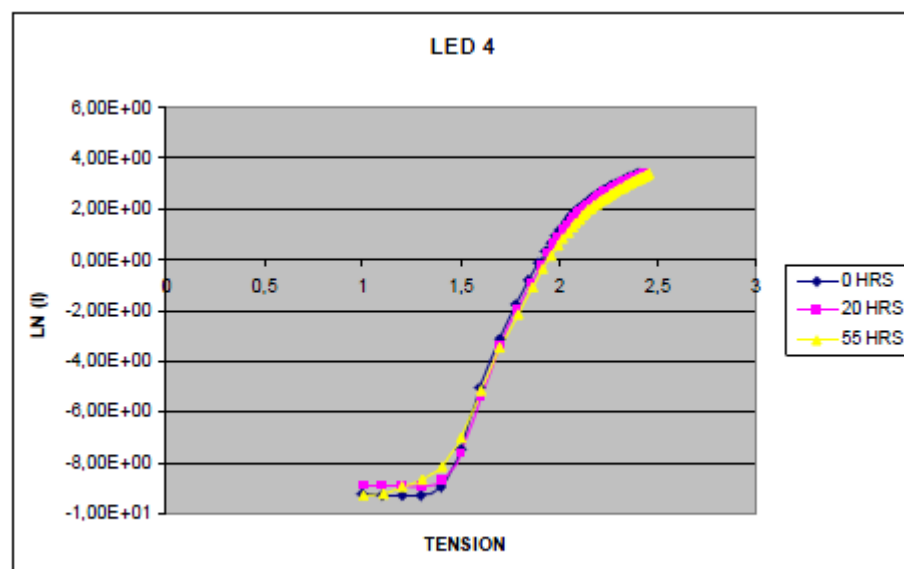
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

## LED 4



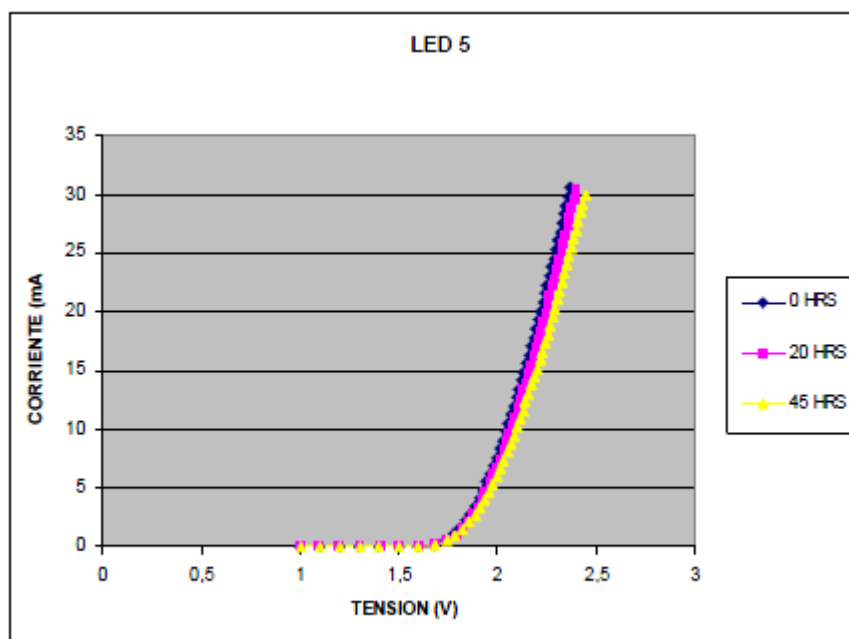
Gráfica V-I



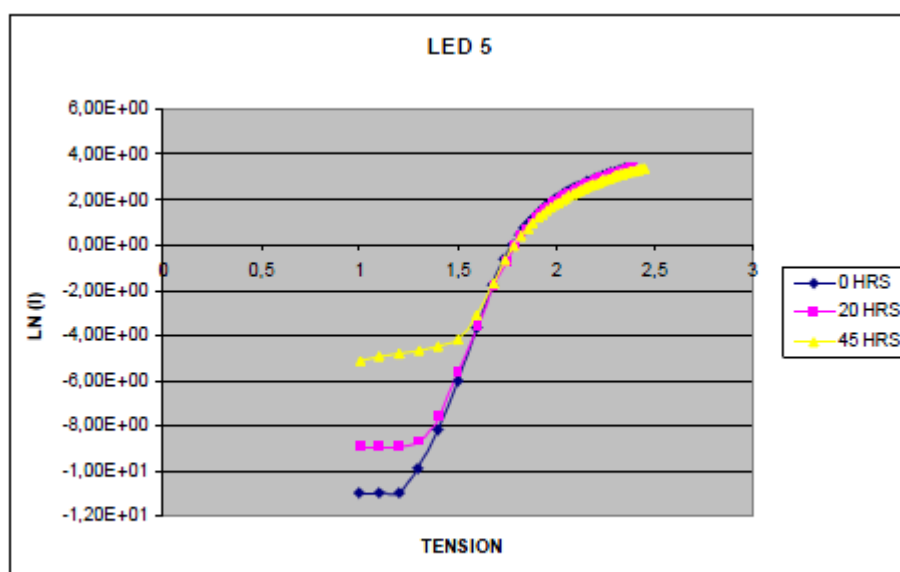
Gráfica degradación de  $R_s$

Este diodo no presentó fallo durante todo el ensayo y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento ligero de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

### LED 5



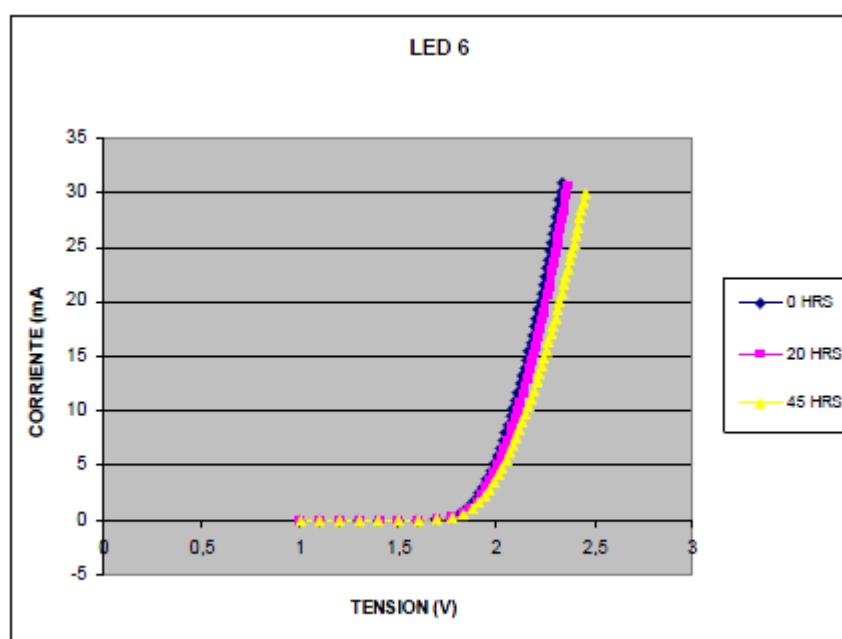
Gráfica V-I



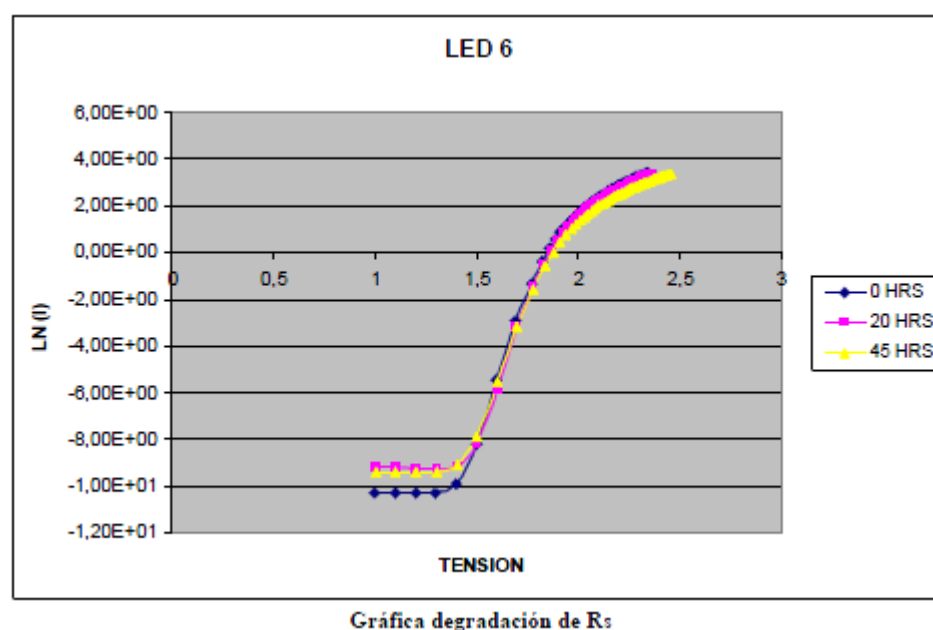
Gráfica degradación de  $R_s$

Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

### LED 6

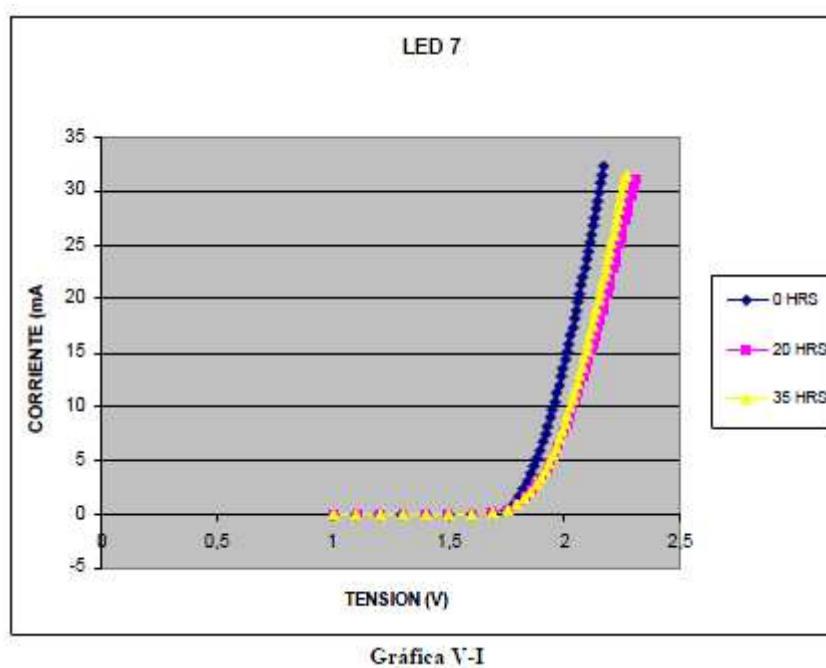


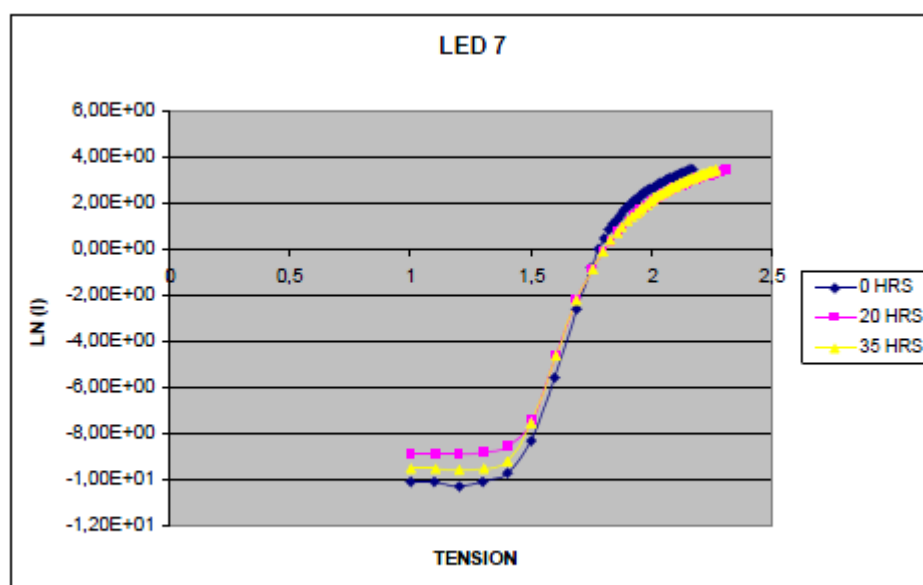
Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe una ligera a moderada degradación de la curva I-V.

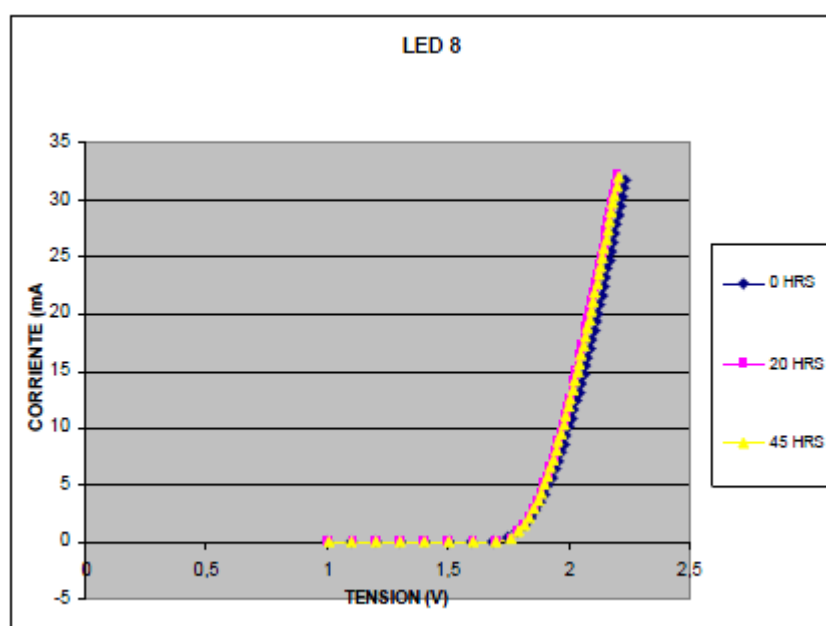
### LED 7



Gráfica degradación de  $R_s$ 

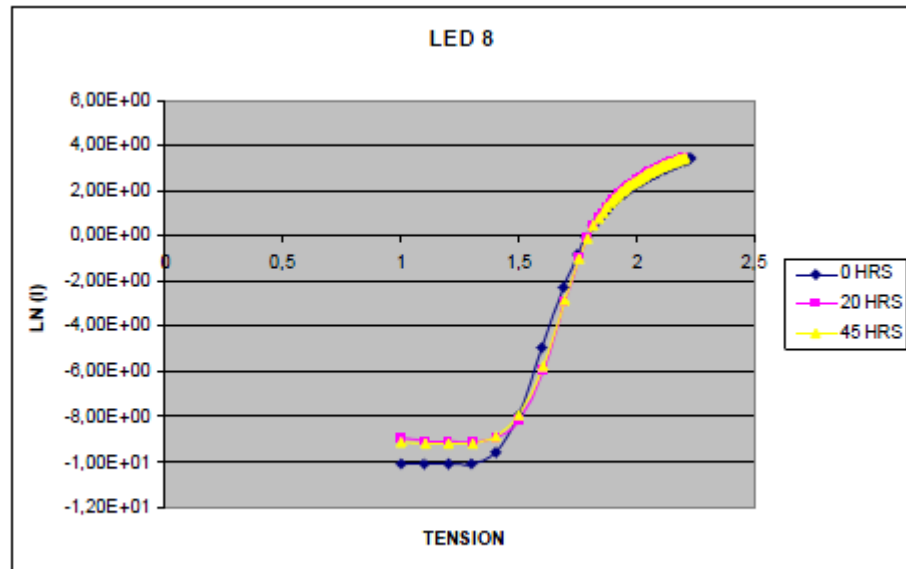
Este diodo presentó fallo a las 35 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera a moderada degradación de la curva I-V.

### LED 8

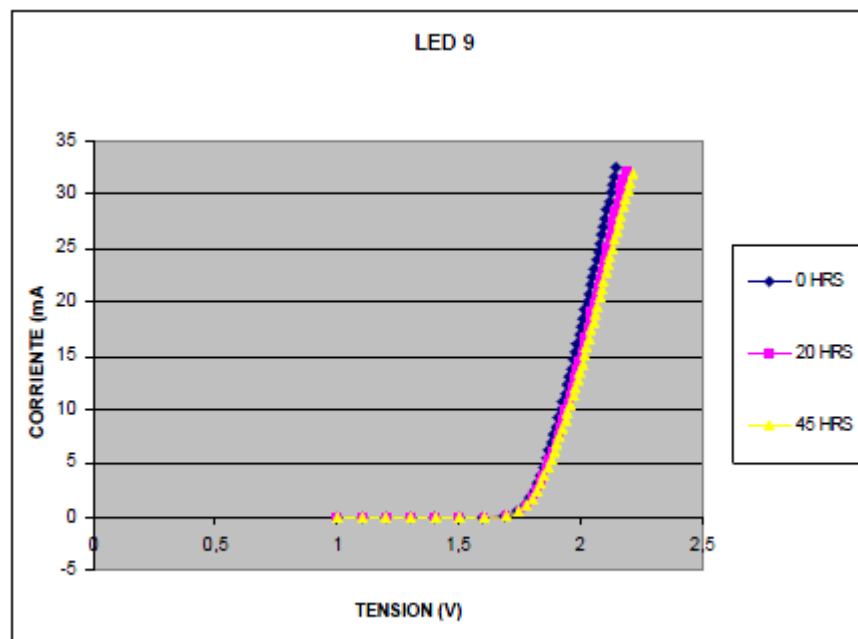


Gráfica V-I

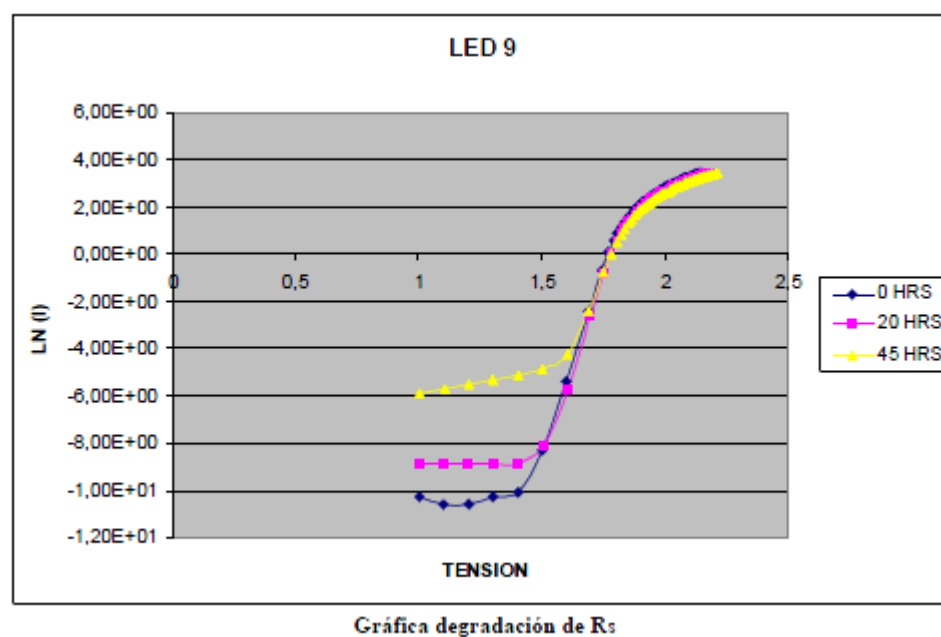


Gráfica degradación de  $R_s$ 

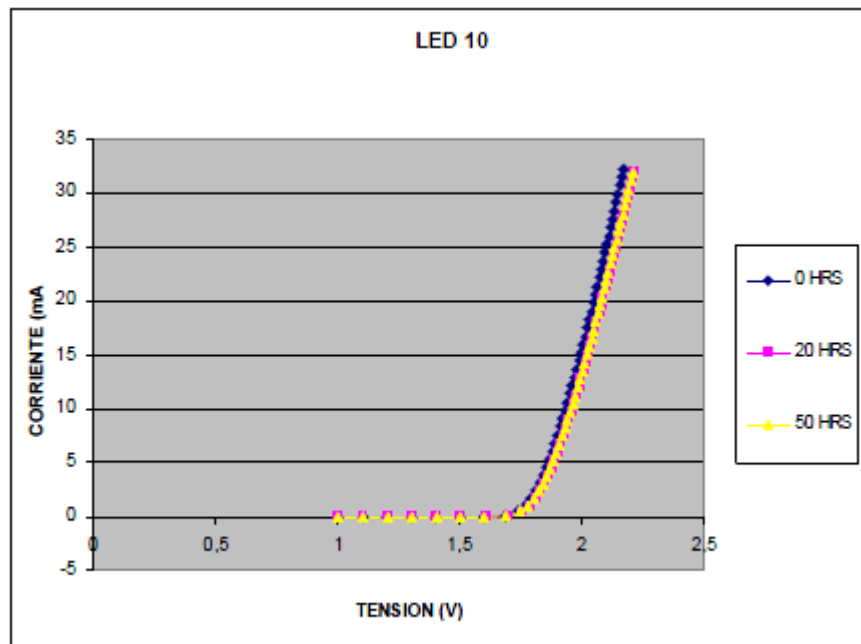
Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

**LED 9**

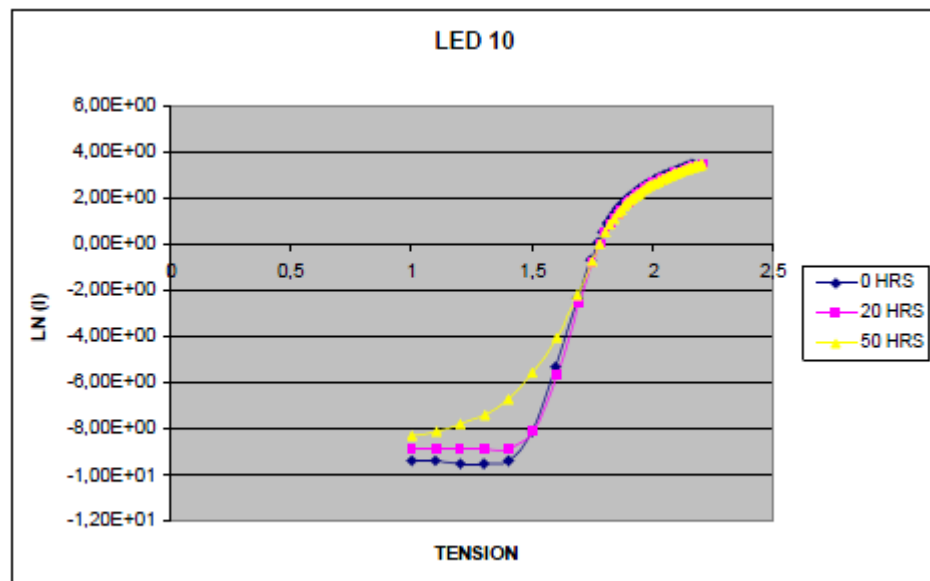
Gráfica V-I



Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

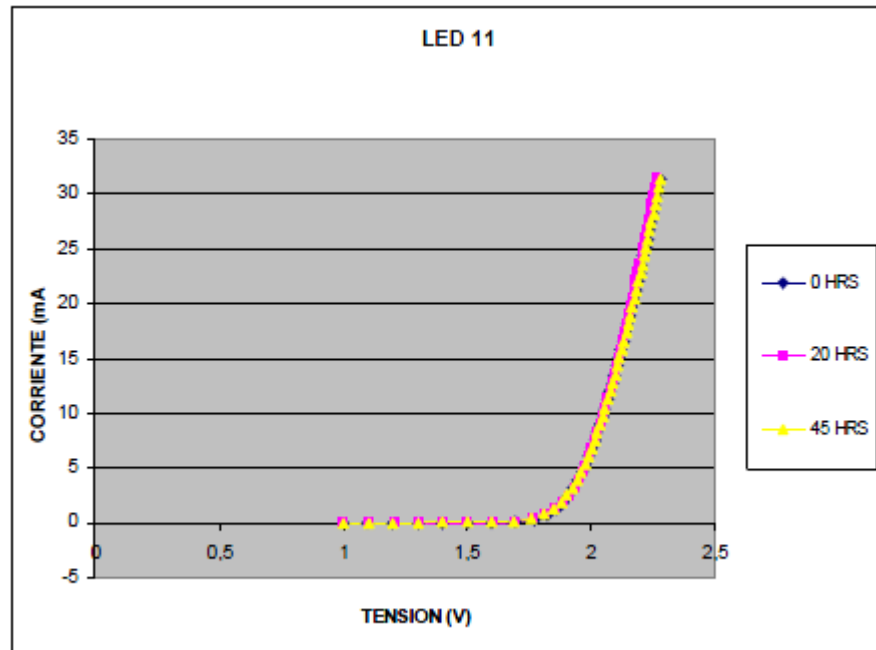
**LED 10**

Gráfica V-I

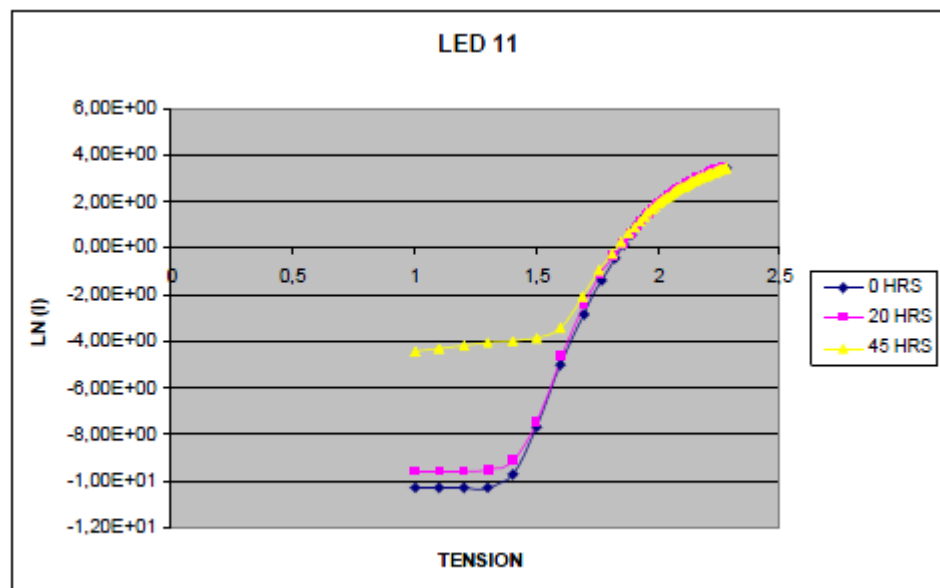
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe bastante degradación de la curva I-V.

## LED 11

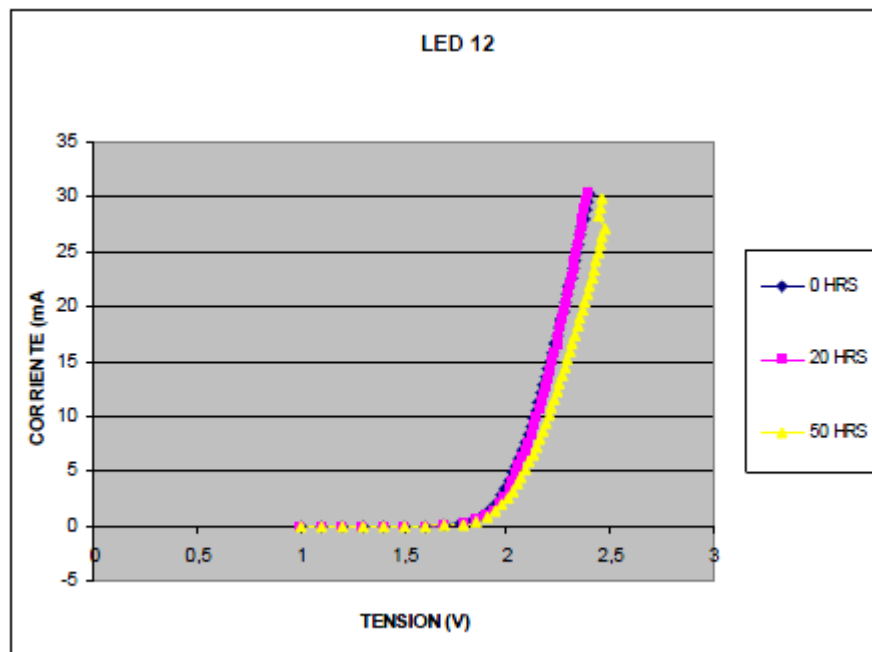


Gráfica V-I

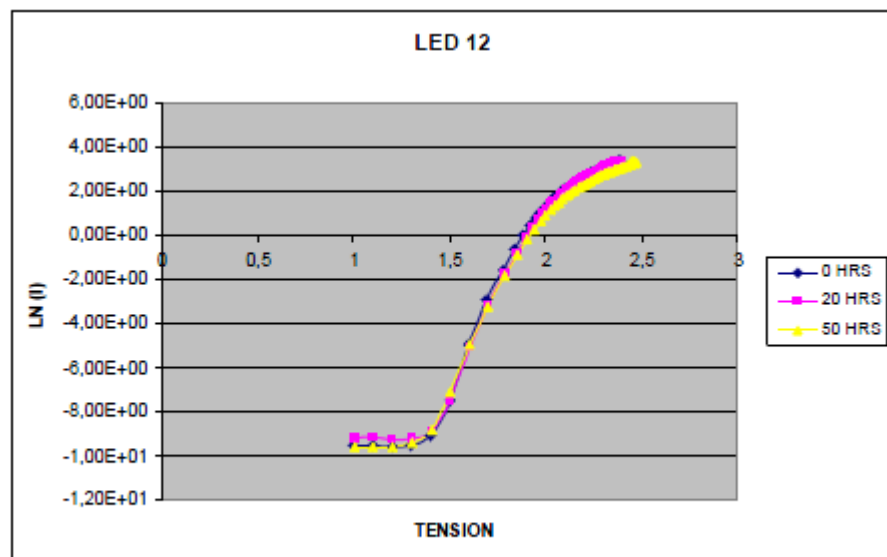
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 45 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

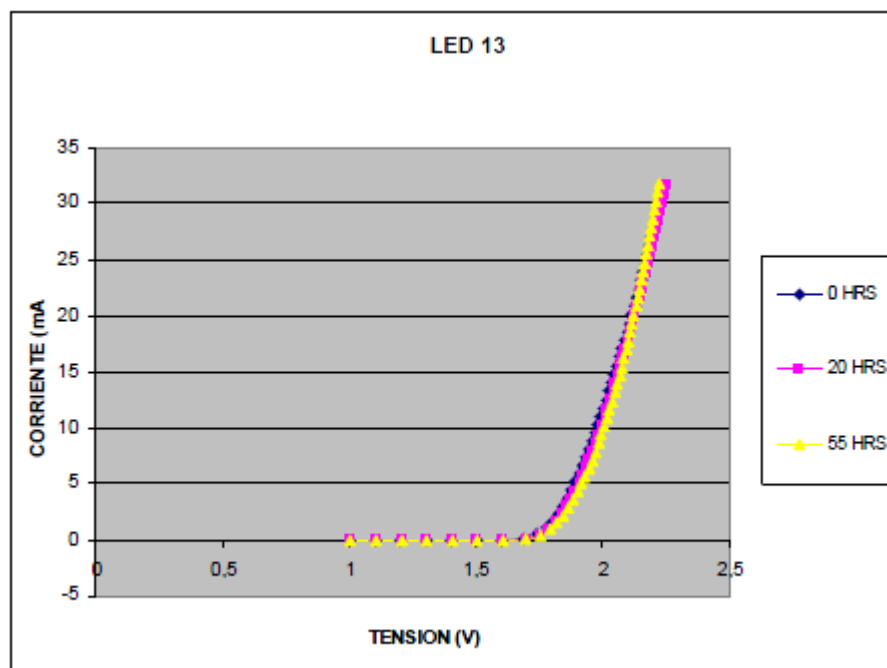
## LED 12



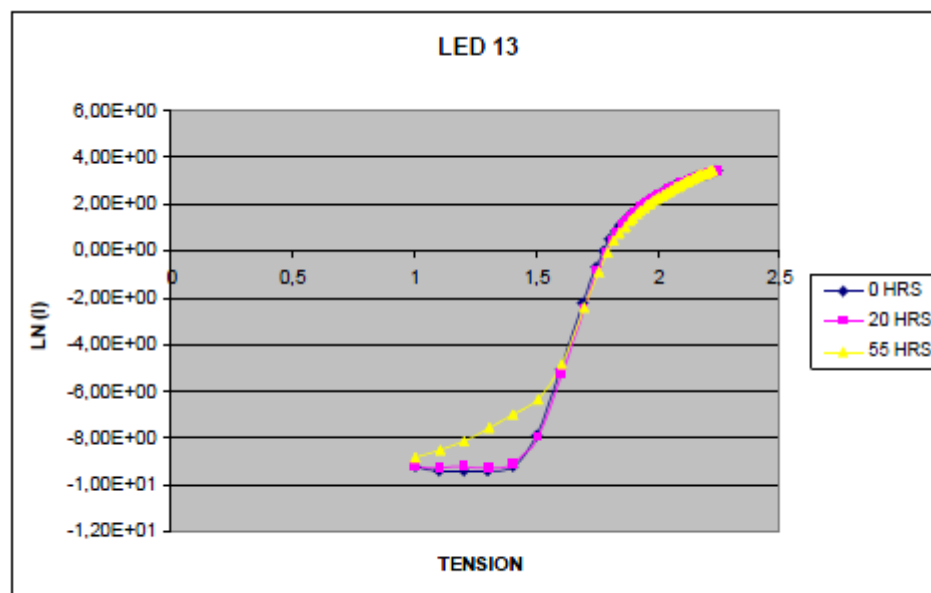
Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera a moderada degradación de la curva I-V.

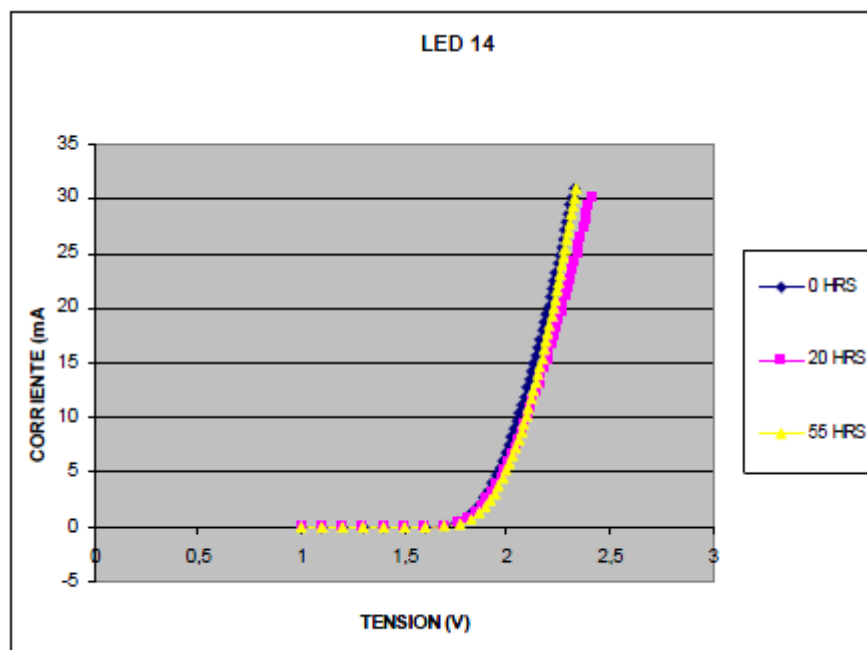
**LED 13**

Gráfica V-I

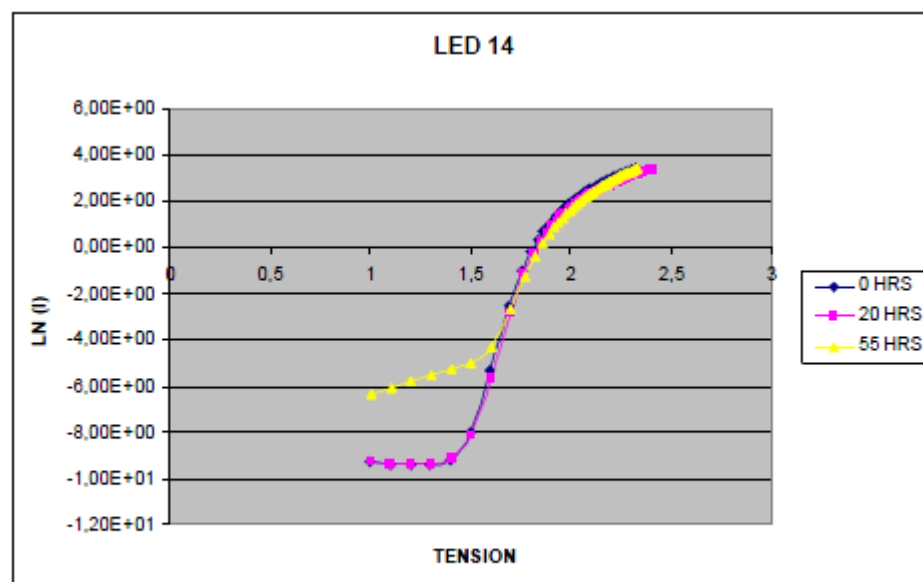
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo no presentó fallo durante todo el ensayo y alcanzó su máximo de potencia a las 10 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe poca degradación de la curva I-V.

## LED 14

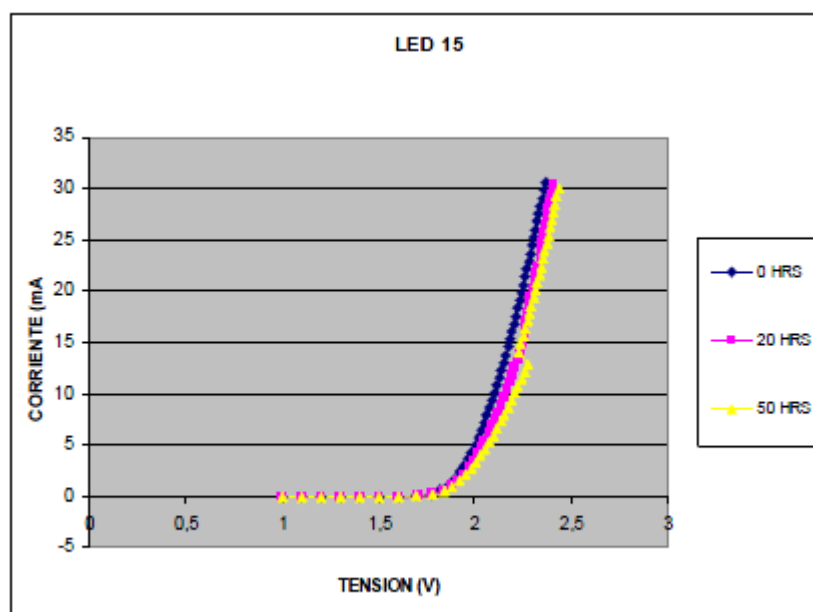


Gráfica V-I

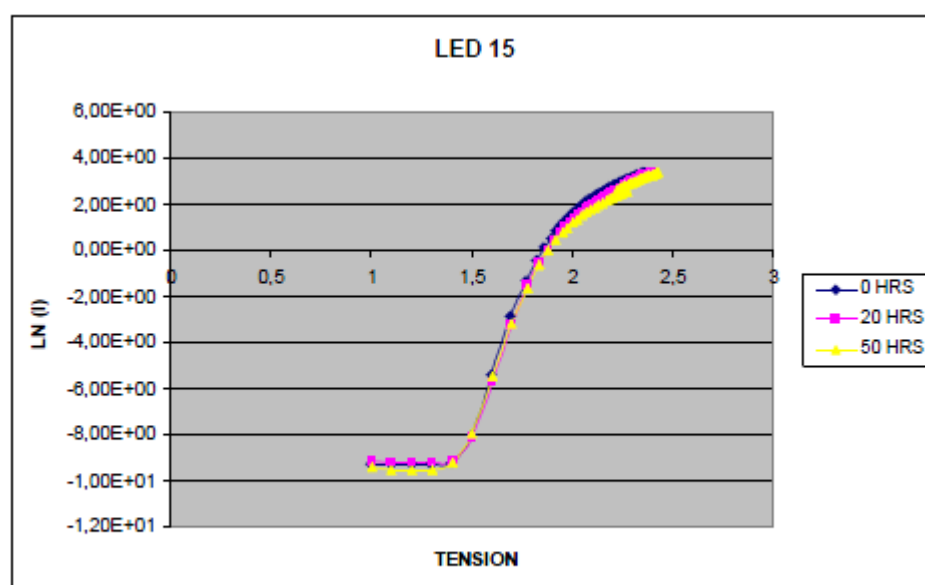
Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo no presentó fallo durante todo el ensayo y alcanzó su máximo de potencia a las 5 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.

## LED 15



Gráfica V-I

Gráfica degradación de  $R_s$ 

Este diodo presentó fallo a las 50 horas por circuito abierto y alcanzó su máximo de potencia a las 15 horas. Se produce un aumento de  $R_s$  y una variación de la corriente de saturación. Existe ligera degradación de la curva I-V.



## 5.4 ANÁLISIS WEIBULL

A continuación vamos a describir el análisis realizado en varios planos, análisis en humedad, en temperatura y en corriente, tomando los datos más relevantes de los ensayos que hemos descrito.

### 5.4.1 ANÁLISIS EN HUMEDAD

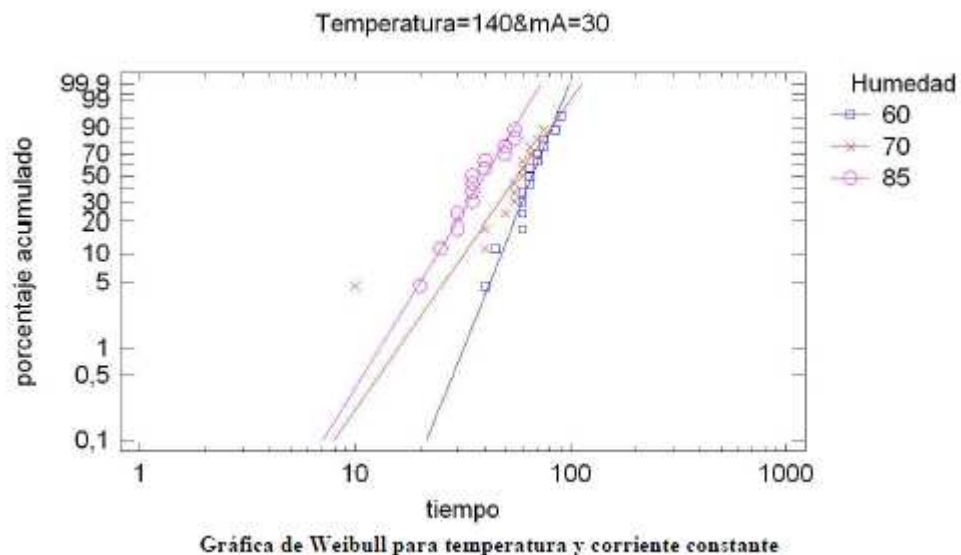
En este análisis se ha utilizado el modelo Peck – Weibull y, en concreto, los datos de los ensayos

140°C 60% RH a 30mA.

140°C 70% RH a 30mA.

140°C 85% RH a 30mA

Tomando como referencia las muestras que han fallado por circuito abierto, obtenemos



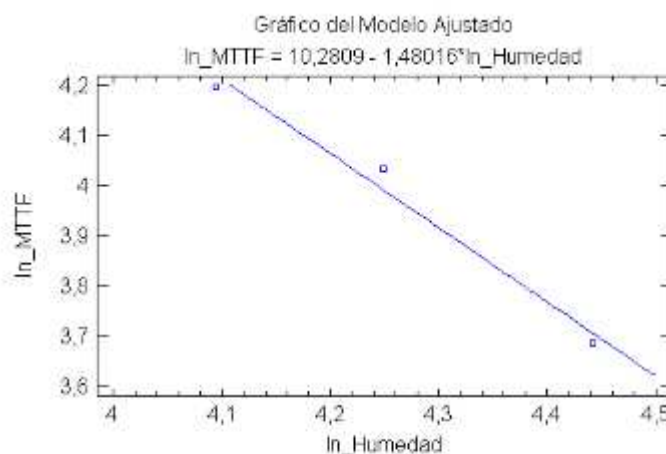
En la siguiente tabla se muestran los resultados de ajustar una distribución de Weibull a los valores de los datos en tiempo. Los parámetros de forma y de escala fueron estimados usando máxima verosimilitud. Se asumió que el valor máximo de la

distribución estaba localizado en 0,0. Se ajustaron distribuciones por separado para los 3 grupos. De los 45 datos, 2 fueron tratados como censurados por derecha, lo que significa que los valores reales pueden ser mayores que los indicados.

<i>Humedad</i>	<i>Tamaño de muestra</i>	<i>Número de fallos</i>	<i>Estimación de forma</i>	<i>Estimación de escala</i>	<i>MTTF</i>
60	15	15	5,79083	70,8259	93,90
70	15	14	3,33656	63,1046	75,65
85	15	14	3,78594	43,9509	57,63

Tabla: Resultados de ajuste de la distribución Weibull para temperatura y corriente constante

#### 5.4.1.1 Factor de aceleración en humedad



Grafica del modelo de Peck

$$MTTF = B \left( \frac{RH_2}{RH_1} \right)^n$$

Donde  $\ln B=10,28$  es una constante y  $n=1,48$  es la pendiente de la gráfica que se obtiene ajustando por mínimos cuadrados logaritmo neperiano de MTTF frente al logaritmo neperiano de humedad.

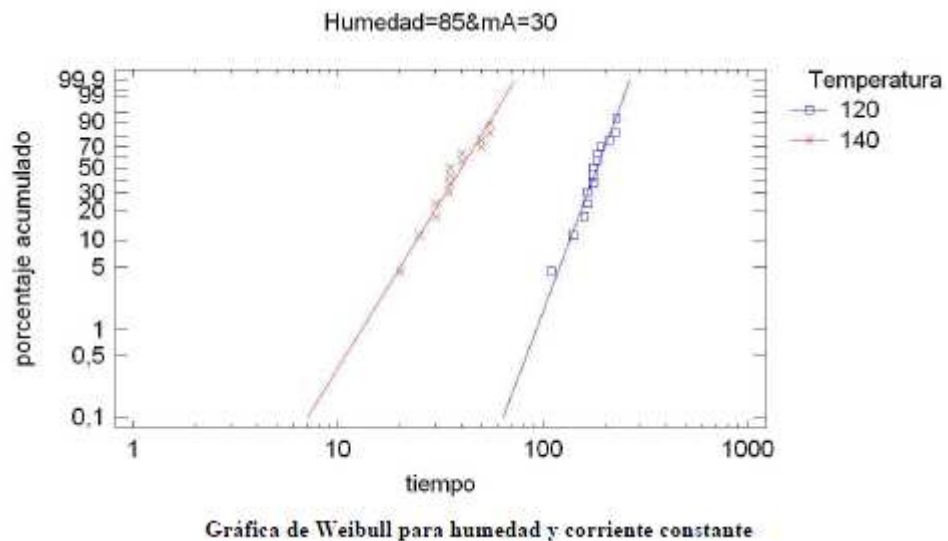
### 5.4.2 ANÁLISIS EN TEMPERATURA

En este análisis se ha utilizado el modelo Peck – Weibull y, en concreto, los datos de los ensayos

120°C 85% RH a 10mA.

140°C 85% RH a 10mA

Tomando como referencia las muestras que han fallado por circuito abierto, obtenemos

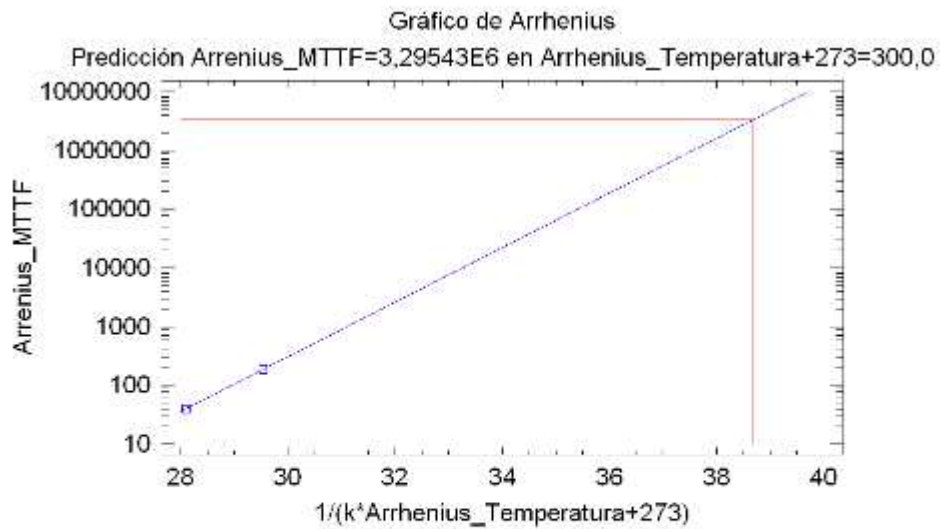


Si observamos la gráfica podemos ver que la pendiente de las dos rectas es mayor que uno y tienen valores próximos entre sí, con lo cual, parece que el fallo en ambos casos ha sido debido a la degradación, en concreto según comentamos, la degradación se ha producido por humedad en el ánodo del diodo.

La siguiente tabla muestra los resultados de ajustar una distribución de Weibull a los valores de los datos en tiempo. Los parámetros de forma y de escala fueron estimados usando máxima verosimilitud. Se asumió que el valor máximo de la distribución estaba localizado en 0,0. Se ajustaron distribuciones por separado para los 2 grupos. De los 30 datos, 2 fueron tratados como censurados por derecha, lo que

significa que los valores reales pueden ser mayores que los indicados, como en el caso de análisis por humedad anterior.

#### 5.4.2.1 Factor de aceleración en temperatura



Gráfica del modelo de Arrhenius

$$MTTF = Ae^{\frac{Ea}{KT}}$$

Siendo  $A=3,52 \cdot 10^{-12}$  una constante,  $Ea=1,0697$  la energía de activación y  $K$  la constante de Boltzmann ( $8,617 \cdot 10^{-5}$  EV/grados K).

#### 5.4.3 ANÁLISIS EN CORRIENTE

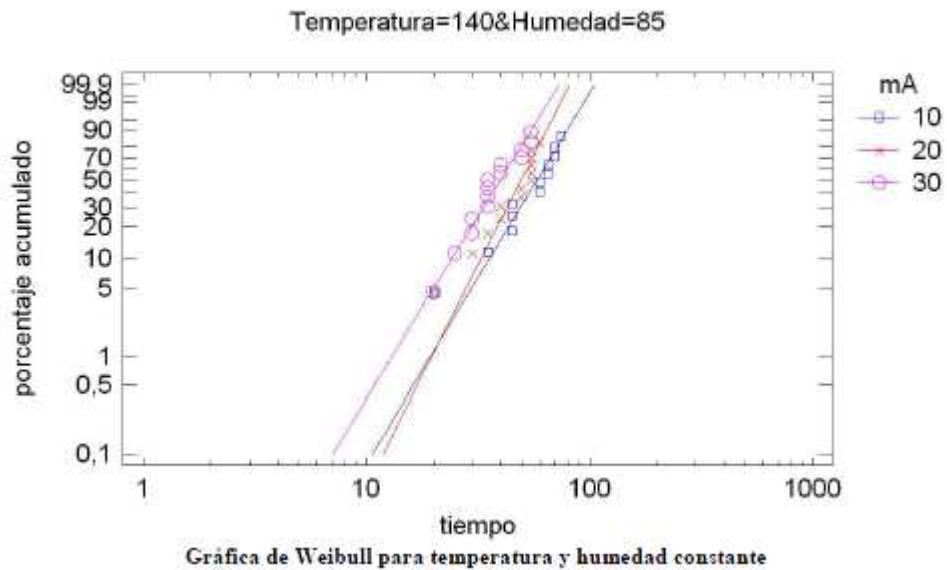
Para realizar este análisis se ha utilizado el modelo de Potencia Inversa. Se han usado los datos obtenidos en los ensayos:

140°C 85% RH a 10mA

140°C 85% RH a 20mA

140°C 85% RH a 30mA

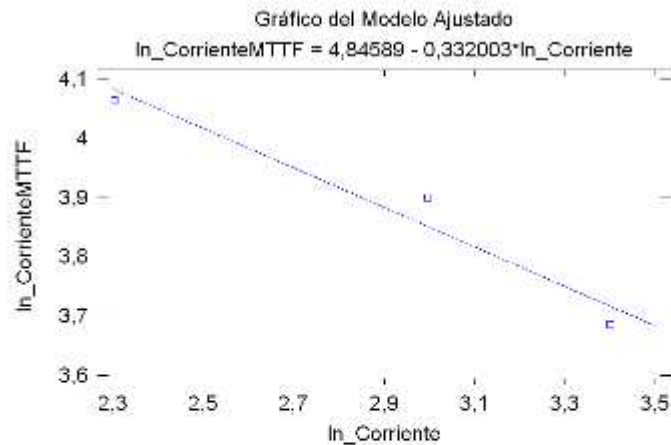
Tomando como referencia las muestras que han fallado por circuito abierto, obtenemos



La siguiente tabla muestra los resultados de ajustar una distribución de Weibull a los valores de los datos en tiempo. Los parámetros de forma y de escala fueron estimados usando máxima verosimilitud. Se asumió que el valor máximo de la distribución estaba localizado en 0,0. Se ajustaron distribuciones por separado para los 3 grupos. De los 45 datos, 6 fueron tratados como censurados por derecha, lo que

significa que los valores reales pueden ser mayores que los indicados, como ya hemos hecho en los dos análisis anteriores.

#### 5.4.3.1 Factor de aceleración en corriente



Gráfica del modelo de Potencia Inversa

$$MTTF = C \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^m$$

Donde  $\ln C=4,8$  es una constante y  $m=0,332$  es la pendiente de la gráfica que se obtiene ajustando por mínimos cuadrados logaritmo neperiano de MTTF frente al neperiano de humedad.

## 6. CONCLUSIONES

A continuación, vamos a exponer las conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos en los ensayos.

Como punto de partida, se puede decir que hemos comprobado que se puede acelerar el fallo de un LED variando sus condiciones de temperatura, humedad o corriente de trabajo, y jugando con estos factores, conseguir tiempos de vida diferentes.

Se ha comprobado que, para una corriente de trabajo baja, de 10mA, el fallo por circuito abierto se produce antes de que la potencia luminosa disminuya por debajo del 70% de la potencia inicial, lo que hemos considerado la potencia umbral para considerar como caso de fallo, que es el umbral que se considera para el fallo por degradación. Aunque todos los LED han experimentado un aumento de la potencia luminosa al principio del ensayo, para corrientes de trabajo mayores, la degradación aparece antes del fallo del diodo en muchos casos. Con esto, podemos decir que cuanto mayor sea la corriente del diodo, mayor será, evidentemente su intensidad luminosa, pero su MTTF descenderá también, con lo cual siempre habrá que encontrar un valor de compromiso entre los dos factores.

Se observa también que todos los diodos han fallado por fallos catastróficos por circuito abierto, excepto aquellos en los que se han presentado fallos infantiles de rotura de la patilla de ánodo. La poca presencia de humedad en los que no han fallado, certifica que la oxidación del ánodo ha sido la causa del fallo. Además, los ensayos con condiciones de humedad más duras, han sido los ensayos en los que los LED han tenido menos tiempo de vida.

Hemos tenido el caso de un ensayo, el de 140 °C y 60% HUMEDAD a 30mA., que no han sido aptos para el cálculo del factor de aceleración, ya que la estimación de

forma era demasiado elevada, lo que constituía un número de fallos con respecto al tiempo de vida fuera del rango de los otros ensayos del proyecto.

Con respecto a la tensión y la corriente, en la mayoría de los LED podemos ver una degradación de la curva I-V, así como un aumento de la resistencia interna y de la corriente de saturación, correspondiendo con los datos de decremento de potencia luminosa.

Como resumen de lo anterior se puede comentar que, según los datos obtenidos, los factores influyentes en el tiempo de vida del diodo han sido, por orden de influencia, la temperatura, la humedad y la corriente, siempre y cuando sea inferior a 30mA., y que siempre habrá que encontrar un valor de compromiso para la utilización del LED en cuanto a la corriente y al MTTF que se requiera.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

*Fiabilidad por "Joel A. Nachlas"*

*Fiabilidad Bases teóricos y prácticas "J. Warleta"*

*Light Emitting Diodes 2ª Edición por "E. Freud Schubert"*

*Tecnología LED y su uso en luces de señalización por I.A.L.A*

*Physics of Semiconductor Devices 3ª Edición por "S. M. Sze"*

*Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analyzes*

*PFC Rubén Martín Muñoz*

*Análisis con Statgraphics*

*Ponencia Global 2009 Asset Management Iberoamericana "Ensayos Acelerados de LEDs para señales de tráfico"*

*Espectroscopía de polarización en vapor de rubidio utilizando un diodo láser con cavidad extendida, Adonis Reyes Reyes, Universidad Autónoma de México.*

*El diodo de emisión de luz, Universidad de Valencia*

*([www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B\\_T3.pdf](http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T3.pdf))*

*<http://www.weibull.com>*

*<http://www.ni.com>*

<http://www.monografias.com>

<http://www.wikipedia.com>

<http://www.home.agilent.com>

<http://archivo.devotodigital.com.ar/2011/03/25/semaforos-con-leds>

<http://www.respuestario.com/como/como-conectar-leds-en-serie-pasos-para-lograrlo>

[www.learobotics.com](http://www.learobotics.com)

<http://www.tecnyo.com>

[www.opto-electronics.com.cn](http://www.opto-electronics.com.cn)

[www.ofiled.com](http://www.ofiled.com)

## 8. ANEXOS

### ANEXO I: PONENCIA CONGRESO VALENCIA (ENSAYOS ACELERADOS DE LEDS PARA SEÑALES DE TRÁFICO)



#### ENSAYOS ACELERADOS DE LEDs PARA SEÑALES DE TRÁFICO

*Nogueira Díaz, E. <sup>(1)</sup> (P) Álvarez Nuevo, D. <sup>(1)</sup> Pedruelo Bragado, J. <sup>(1)</sup> Martín Muñoz, R. <sup>(1)</sup>*  
 Universidad Politécnica de Madrid, E.U.I.T. de Telecomunicación, Departamento de  
 Electrónica Física, España <sup>(1)</sup>

##### Resumen

La aparición de LED de alta eficiencia luminosa ha hecho posible la utilización de este tipo de dispositivos en aplicaciones en las que han de ser visibles a grandes distancias, tales como señales de tráfico o luces para automóviles. Dado que este tipo de aplicaciones conlleva un funcionamiento en ambientes a la intemperie con temperatura y humedades que pueden llegar a ser muy elevadas, se hace necesario el conocer la respuesta de estos dispositivos en tales situaciones.

En este trabajo se han realizado ensayos a altas temperaturas y humedades con pressure cooker con el fin de acelerar los fallos y poder obtener el factor de aceleración en humedad y temperatura. También se ha calculado la energía de activación para el tipo de fallo que ha aparecido en las pruebas. Así mismo se han representado los resultados de los ensayos mediante Weibull calculándose el MTTF para cada uno de los ensayos.

**Palabras claves:** LED, Fiabilidad, Pressure Cooker, Ensayos acelerados, Confiabilidad,

##### 1. Introducción

Los diodos LED son diodos semiconductores que al ser atravesados por una corriente emiten una radiación electromagnética. El espectro de esta radiación está limitado a una estrecha banda de longitudes de onda, la longitud de onda de la radiación emitida viene determinada por el material semiconductor empleado, AlGaInN azul, GaP verde, AlGa InP ámbar o AlInGaP para el rojo y naranja.

Hasta hace pocos años la mayoría de los LED disponibles comercialmente eran de baja intensidad, lo que limitaba sus aplicaciones en las que la distancia del observador fuera pequeña, un ejemplo típico de este tipo son los pilotos indicadores. Con la aparición de los LED de alta intensidad ha sido posible la sustitución de las lámparas utilizadas hasta ahora en las señales de tráfico.

Dado que las señales de tráfico han de trabajar en ambientes en las que las condiciones de humedad y temperatura son muy variables, resulta necesario conocer el comportamiento de

estos dispositivos en condiciones de temperatura y humedad que permitan reproducir sus condiciones de funcionamiento normal.

## 2. Muestras

Como muestras se han utilizado LED de AlInGaP de color rojo (longitud de onda 626/630 nm), lo que hace que la separación entre el nivel mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia sea de unos 1,97 eV. El encapsulado es el T-1 ¾ (5 mm) en epoxy transparente. La eficiencia luminosa está entre 150 y 155 lm/w para una corriente de 20 mA.

## 3. Ensayos

Se han realizado ensayos acelerados en una pressure cooker<sup>i ii iii</sup> con el fin de obtener resultados en tiempos pequeños.

En la Figura 1 se muestra el esquema de conexionado. Como puede observarse en la cámara sólo se encuentran los LED sometidos a ensayo, que son alimentados a través de resistencias de 120 ohm, con el fin de que el fallo de un elemento no influya en el resto. La fuente de alimentación es de 3,1 V, por lo que la corriente que circula por los LED es aproximadamente de 10 mA.

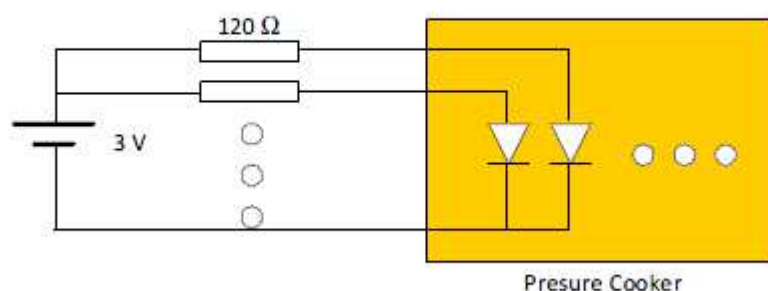


Figura 1 Esquema conexionado

Con el fin de detectar los fallos por circuito abierto, corto o variación de corriente (la monitorización de este parámetro junto con las curvas I-V permiten detectar la degradación de los parámetros IRS e IS, como se analizará mas adelante) se monitorizó el ensayo midiendo la tensión en cada una de las resistencias y la tensión en la fuente de alimentación. De esta forma se puede conocer la tensión en cada uno de los LED, como la diferencia entre la tensión de la fuente y la tensión en la resistencia de polarización correspondiente, y la corriente en cada LED calculando el cociente entre la tensión en cada una de las resistencias entre el valor de la resistencia. Estas medidas se realizan cada quince minutos.

Esta monitorización se realizó mediante el uso de un polímetro junto con una matriz de conmutación y una fuente de alimentación. En la Figura 2 puede verse la foto del conjunto de aparatos junto con la pressure cooker. Todo el conjunto se controlaba a través de un ordenador con bus IEEE-488.

En el ordenador se ejecuta un programa de control de instrumentación para monitorizar el sistema de adquisición de datos. Como se ha comentado antes, cada 15 minutos el programa conmuta automáticamente cada uno de los canales a medir y almacena en un fichero todas las medidas acompañadas de fecha, hora y minuto de medida.





Figura 2 Foto de polímetro con matriz de conmutación, fuente de alimentación y pressure cooker.

En la bibliografía consultada se describen los siguientes modos de fallo:

- a) Circuito abierto, esto se detecta cuando la tensión en la resistencia de polarización es cero lo que implica que la corriente por el diodo es cero.
- b) Cortocircuito, se detecta cuando la tensión en la resistencia de polarización es igual a la tensión de la fuente de alimentación, lo que implica que la tensión en el diodo es cero. En los ensayos no se ha detectado ningún fallo de este modo.
- c) Disminución de potencia en un 70% del valor inicial, este valor se ha tomado de <sup>iv</sup>. Este valor se toma para usos generales en los que la disminución de la potencia óptica es importante, como por ejemplo para señales de tráfico. Para aplicaciones no críticas se admite una reducción hasta el 50%, hay fabricantes <sup>v</sup> que admiten reducciones hasta del 50% para aplicaciones de tráfico. En el presente trabajo se tomará como fallo por degradación cuando la potencia luminosa caiga por debajo del 70% de la potencia inicial, este valor es lo que propone la ASSIST (Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technology). Este modo de fallo va asociado con una degradación en la curva I-V del diodo, esto se detecta al disminuir la corriente respecto al valor inicial de la misma, en la Figura 3. Este modo de fallo también puede ser debido a degradación del encapsulado <sup>vi</sup>, en los ensayos realizados no ha aparecido este fallo.

Cada 5 horas se sacaban los LED de la pressure cooker, se medía la potencia luminosa polarizando el diodo con una corriente de 20 mA y se realizaban las curvas I-V.

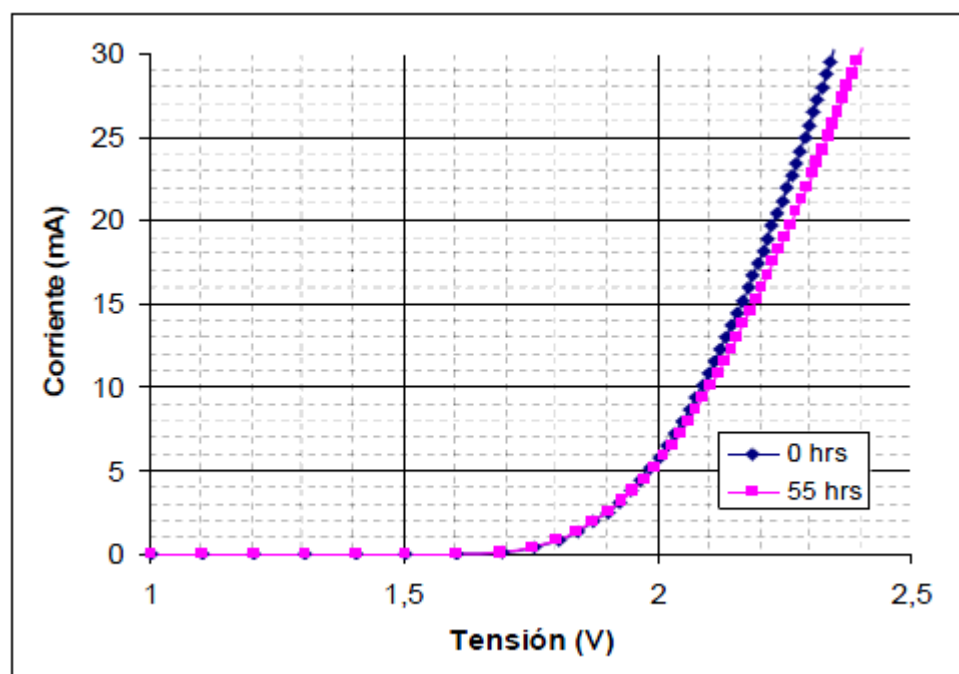


Figura 3 Disminución de la corriente por degradación de la curva I-V

#### 4. Análisis de fallos

Los tres modos de fallo descritos en el punto anterior, sólo se detectaron dos modos, circuito abierto y disminución de potencia luminosa, si bien en este caso en ninguno de los ensayos la pérdida de potencia bajo del 70 % de la potencia inicial. En ningún caso se detectó cortocircuito. Se ha detectado que, en los diodos, la luminosidad de los LED mejora <sup>vii</sup> <sup>viii</sup> al comienzo del ensayo para luego volver a disminuir. En la Figura 4, se puede ver la mejora de la potencia luminosa al comienzo del ensayo para, a partir de un cierto instante dependiente de las condiciones de ensayo, comenzar a disminuir con el tiempo.

Con el fin de determinar el mecanismo de fallo correspondiente al modo de fallo en circuito abierto, se realizó una inspección óptica de los LED con un microscopio. No se han observado roturas del hilo de bonding entre el ánodo y el cátodo por lo que el circuito abierto debe ser achacable a un fallo en los bonding de ánodo o cátodo.

Se ha observado que en los LED se produce una penetración de humedad por el ánodo (terminal positivo) como puede verse en las fotos de la Figura 5. Esto es debido a que en la cámara están polarizados en directa, pudiéndose producir una reacción de iones OH<sup>-</sup> con el metal del ánodo. Este tipo de fenómeno aparece en mayor o menor medida en todos los LED sometidos a ensayo. También se ha observado que en muchos de los LED unas horas antes de dejar de funcionar definitivamente, su comportamiento se hace variable, funcionando o no de manera intermitente.

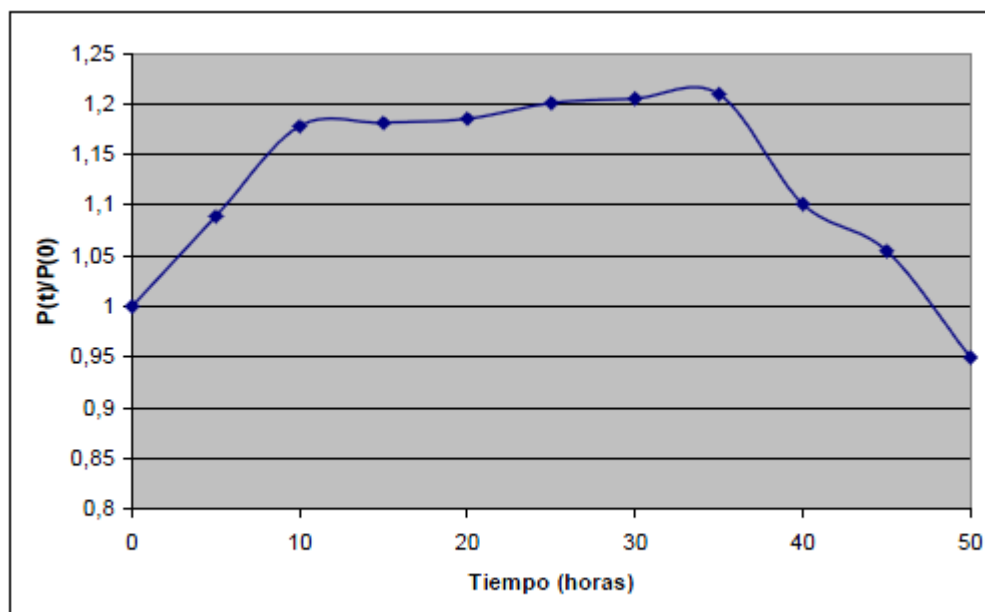


Figura 4 Aumento de los potencia luminosa



Figura 5 Oxidación del ánodo por penetración de humedad

A pesar de que todos los fallos que se han producido son catastróficos en algunos de los LED se ha detectado una degradación de la luminosidad. Esta degradación va asociada con una deriva de la curva I-V que es achacable a dos factores aumento de  $R_s$  y variación de  $I_{SR}$ . En la Figura 6 se muestra las curvas de uno de los diodos para 0 y 55 horas de ensayo en la que puede observarse que la curva a 55 horas primero se desplaza a la izquierda de la curva a 0 horas, para luego cortarse y desplazarse a su derecha. Mediante SPICE se ha simulado este comportamiento utilizando el modelo de LED MLED81 y se ha logrado obtener el mismo comportamiento

variando los parámetros  $R_s$  e  $I_{SR}$ . En el análisis visual del encapsulado no se ha detectado un deterioro significativo que pueda implicar una disminución del flujo luminoso.

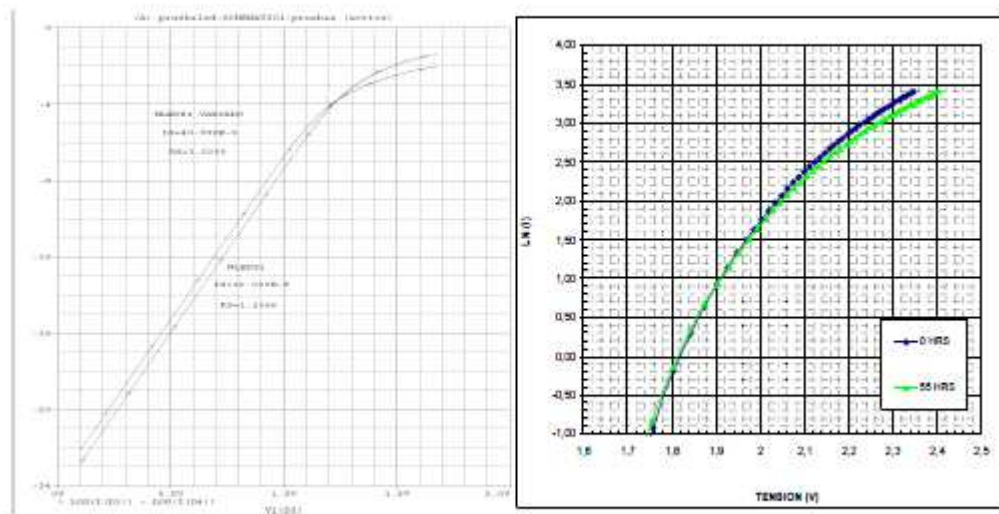


Figura 6 Variación de curva I-V debido a  $R_s$  e  $I_{SR}$



Todos los LED han fallado catastróficamente, en varios casos se ha detectado fallo del wirebonding, hay casos en los que no se ha podido determinar el tipo de fallo, si bien el modo siempre ha sido circuito abierto.

### 5. Resultados

En la tabla que se muestra a continuación se pueden ver las condiciones de humedad y temperatura de los tres ensayos, junto con la duración del ensayo.

Temperatura °C	Humedad Relativa %	Duración (horas)
120 °C	85 %	>155
140 °C	70 %	105
140 °C	85 %	80

Tabla 1 Condiciones de los ensayos

#### 5.1. Ensayos 140° C, 120 ° C a 85% RH

En la Figura 7 se han representado los ensayos para una humedad del 85% y dos temperaturas diferentes 120 y 140 ° C, como puede observarse en los dos casos la pendiente es mayor de uno lo que indica un fallo por envejecimiento. También puede observarse que los valores de las pendientes son muy parecidos lo cual implica que el mecanismo de fallo es el mismo, en este caso penetración de humedad por el ánodo produciendo el fallo en el wirebonding de esta patilla. En la Figura 8 se muestran el MTTF, factor de forma y factor de escala para 140° C, 120° C a 85% de humedad relativa. El ensayo a 140° C y 85% no se ha dado por terminado en el momento de escribir este artículo por lo que la curva se ha estimado con cinco puntos.

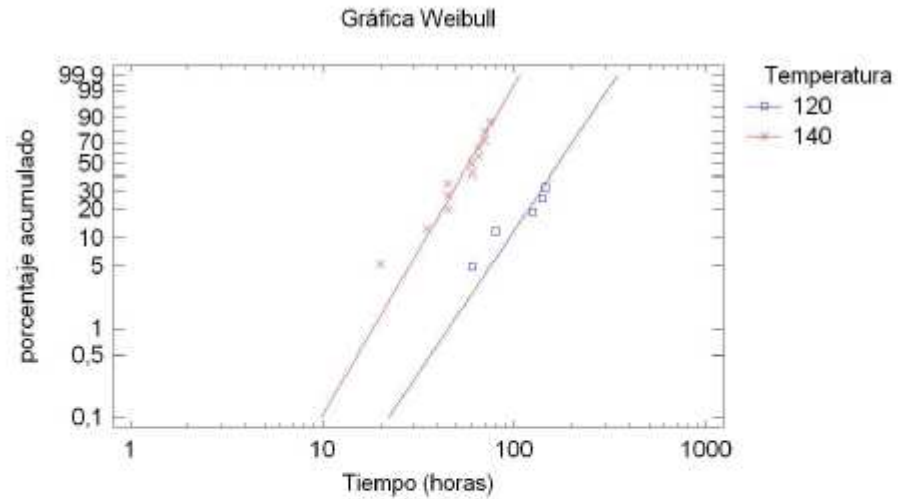


Figura 7 Gráfica de Weibull para 140° C, 120 ° C a 85% de humedad relativa

$T^{\circ}C$	Tamaño de Muestra	Número de Fallos	Factor de Forma $\beta$	Factor de Escala	MTTF horas
120	15	5	3,21121	193,938	173,019
140	13	12	3,72079	63,2862	57,3495

Figura 8 MTTF, factor de forma y factor de escala para 140° C, 120 ° C a 85% de humedad relativa

## 5.2. Ensayo 140° C con RH de 70% y 85%

En la

Figura 9 se han representado los ensayos para una temperatura de 140 °C y dos humedades diferentes 70% y 85%, como puede observarse en los dos casos la pendiente es mayor de uno lo que indica un fallo por envejecimiento. En la Figura 10 se muestran el MTTF, factor de forma y factor de escala para 70% y 85% a 140 °C de temperatura.

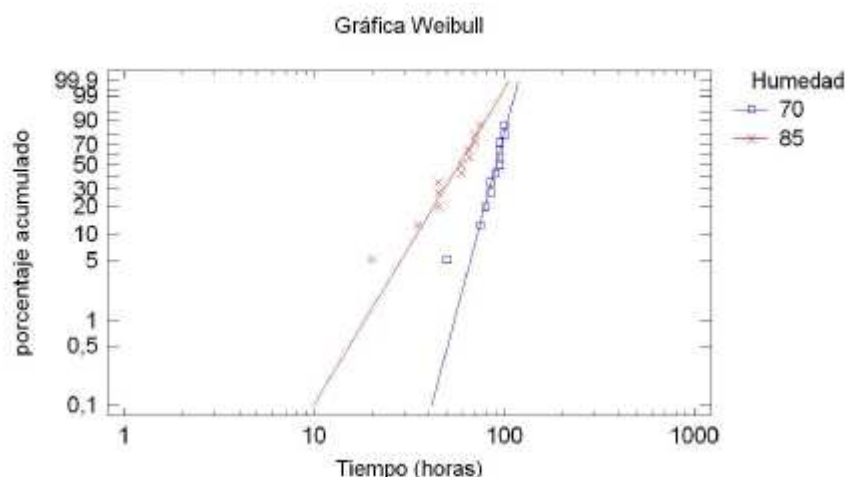


Figura 9 Gráfica de Weibull para 140° C con humedades relativas de 85% y 70%

RH	Tamaño de Muestra	Número de Fallos	Factor de Forma $\beta$	Factor de Escala	MTTF horas
70 %	13	12	8,3937	94,2149	90,1895
85 %	13	12	3,72079	63,2862	57,3495

Figura 10 MTTF, Factor de forma y factor de escala para 140° C con humedades relativas de 85% y 70%

### 5.3. Factores de aceleración en temperatura y humedad

Se ha realizado la curva de Arrhenius para el modo de fallo en circuito abierto, este modo de fallo corresponde con la penetración de humedad por el ánodo, se ha obtenido una energía de activación de 0,77 eV<sup>ix</sup>.

Asimismo se han estudiado modelos para el factor de aceleración por humedad Lawson y Peck, los mejores resultados se han obtenido para el modelo de Peck, obteniéndose un valor para el exponente  $n$  de 2,33. Este valor es similar a los calculados para mecanismo de corrosión [10] descritos en la bibliografía. En la Figura 10 se ha dibujado el gráfico correspondiente, dado que se ha representado  $\ln(RH)$  frente a  $\ln(MTTF)$  en valor de  $n$  es el inverso de la pendiente de la recta.

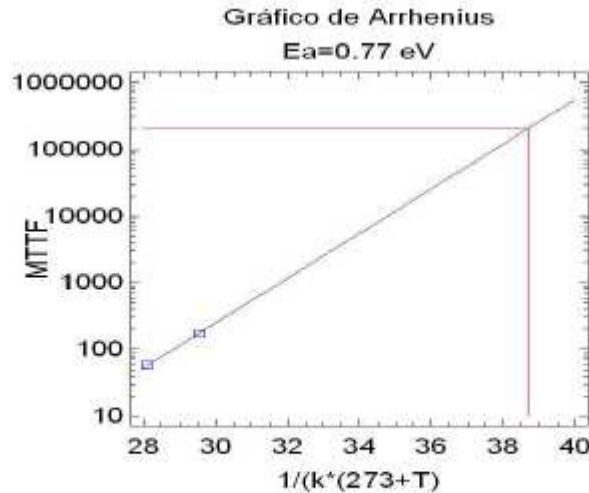


Figura 11 Curva Arrhenius para 140° C, 120 ° C

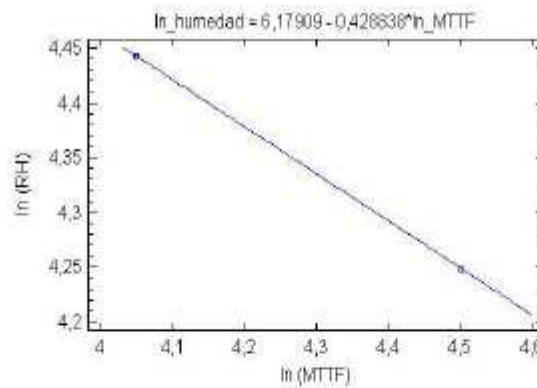


Figura 12 Gráfica del modelo de Peck

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene el modelo para en cálculo del MTTF:

$$MTTF = 57,34 * \left(\frac{85}{H}\right)^{2,33} * e^{\frac{0,77}{k} \left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+140}\right)} \quad (1)$$

## 6. Conclusiones

Se han analizado los mecanismos de fallo de los LEDs de AlGaInP, a pesar de que el modo de fallo que se ha producido en todos los ítems fallados ha sido circuito abierto, antes de producirse el fallo catastrófico los LEDs han presentado una degradación en la curva I-V, esta degradación es achacable a la variación de los parámetros RS e IRS de acuerdo a los resultados obtenidos mediante la simulación con SPICE.

La energía de activación calculada se corresponde con el modo de fallo por circuito abierto, achacable al deterioro del wirebonding del ánodo por la entrada de humedad por dicha patilla.

Dada la forma de degradación de la curva I-V, si se quiere que la variación del flujo luminoso con el tiempo sea más pequeña, se ha de polarizar con valores de resistencia elevados y valores de tensión elevados de forma que la recta de carga tenga la menor pendiente (en valor absoluto) posible.

## 7. Referencias

<sup>i</sup> R.W. Lawson "The Accelerated Testing of Plastic Encapsulated Semiconductor Components" Reliability Physics Symposium, April 1974 . 12th Annual

<sup>ii</sup> Peck, D. Stewart "Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation" Reliability Physics Symposium, April 1986. 24th Annual.

<sup>iii</sup> JEDEC JESD22-A102-C Accelerated Moisture Resistance - Unbiased Autoclave, DECEMBER 2000; Reaffirmed JUNE 2008

<sup>iv</sup> Jennifer Taylor "Industrial alliance proposes standard definition for LED life" LED's magazine April 2005

<sup>v</sup> Hewlett Packard "Reliability of precision optical performance AlInGaP LED Lamps in Traffic signals and variable message signs" Application Brief I-004

<sup>vi</sup> Reliability of Precision Optical Performance AlGaInP Lamps in Traffic signals and Variable Message Signs." Application Brief I-004 Hewlett Packard (1997)

<sup>vii</sup> Agilent Technologies "Projected long term HTOL light output degradation of precision optical performance AlInGaP LEDs" Application Brief I-018.

<sup>viii</sup> High reliable and efficient semiconductor wafer-bonded AlInGaP/ GaP light emitting diodes" Kish, F.A. Vanderwater, D.A. DeFevere, D.C. Steigerwald, D.A.

<sup>ix</sup> J. D.Lacey, D. V. Morgan, Y.H. Aliyu and H. Thomas. "The reliability of (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P visible light-emitting diodes." Qual. Reliab. Engng. Int. 2000, 16 45-49.

<sup>x</sup> D.R. Johnson, D. W. Palmer, D. W. Peterson, D. S. Shen, J. N. Sweet, J. T. Hanlon and K. A. Peterson. "Microelectronics Plastic Molded Packaging" Sandia Report. SAND97-0162.



### 8. Experiencia



**Eduardo Nogueira Díaz** Profesor Titular E.U. del Área de Tecnología Electrónica. Imparte la docencia en el Departamento de Electrónica Física en la E.U.I.T. de Telecomunicación (Universidad Politécnica de Madrid). Durante 18 años trabajó en la empresa Telefónica Investigación y Desarrollo en diversos departamentos tales como Fiabilidad y Materiales realizando trabajos relacionados con fiabilidad y ensayos de equipos. Pertenece al grupo de SC-56 Confiabilidad de AENOR. Ha participado en varios congresos nacionales e internacionales. [eduardo.nogueira.diaz@upm.es](mailto:eduardo.nogueira.diaz@upm.es)



**David Álvarez Nuevo** es alumno de la Universidad Politécnica de Madrid en la Escuela de Ingeniería Técnica de Comunicaciones, que actualmente se encuentra realizando el Proyecto Fin de Carrera sobre Ensayos Acelerados en Dispositivos LEDs y colaborando en una Beca para la empresa Vodafone.



**Rubén Martín Muñoz**, estudiante de Tercer Curso de Ing. Técnica de Telecomunicaciones de la UPM. Se encuentra realizando el Proyecto Fin de Carrera sobre Ensayos Acelerados en Dispositivos LED



**Jesús Pedruelo Bragado** es alumno de la Universidad Politécnica de Madrid, en Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad en Sistemas de Telecomunicación. Actualmente trabaja en el desarrollo de un proyecto de ensayos acelerados de fiabilidad con LED de alta eficiencia óptica como los utilizados en señales luminosas de tráfico.

**ANEXO II: TABLAS MEDIDAS POTENCIA LUMINOSA****ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
L1	0.473	0.577	0.594	0.511	0.674	0.556	0.523	0.509	0.494	0.526	0.485	0.46				
L2	0.445	0.542	0.616	0.509	0.587	0.524	0.635	0.607	0.435	0.459	0.451	0.452	0.481			
L3	0.503	0.586	0.603	0.541	0.58	0.6	0.542	0.59	0.531	0.559	0.471	0.451	0.499	0.509		
L4	0.553	0.623	0.72	0.545	0.571	0.69	0.65	0.673	0.652							
L5	0.508	0.608	0.69	0.583	0.597	0.635	0.57	0.611	0.564							
L6	0.478	0.581	0.506	0.583	0.59	0.63	0.605	0.627	0.649	0.655	0.516	0.542	0.521	0.523	0.523	0.486
L7	0.481	0.608	0.527	0.56	0.5645	0.563	0.575									
L8	0.521	0.604	0.565	0.557	0.578	0.616	0.604	0.589	0.574	0.571						
L9	0.511	0.604	0.571	0.55	0.525	0.61	0.55	0.57	0.49	0.477	0.413	0.45				
L10	0.493	0.56	0.569	0.559	0.55	0.576	0.592	0.608	0.574	0.5045	0.435	0.4265	0.418			
L11	0.44	0.517	0.527	0.488	0.601	0.575	0.55	0.578	0.53	0.477	0.465	0.493	0.439	0.46	0.43	
L12	0.512	0.663	0.591	0.519	0.649	0.639	0.623	0.657	0.591							
L13	0.483	0.7	0.553	0.56	0.607	0.608	0.466	0.523	0.576	0.562	0.563	0.515	0.569	0.572		
L14	0.521	0.57	0.561	0.552												
L15	0.596	0.591	0.552	0.536	0.581											
Fecha	11-02	12-02	13-02	16-02	17-02	18-02	19-02	20-02	23-02	24-02	25-02	26-02	27-02	27-02	02-03	02-03
Media	0.50786667	0.5156	0.58366667	0.5502	0.56539286	0.60169231	0.57576923	0.5035	0.5525	0.53227778	0.474875	0.4756875	0.48783333	0.516	0.4765	0.486



**ENSAYO 140 °C Y 70% HUMEDAD RELATIVA A 10mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0.524	0.422	0.6	0.594	0.562	0.62	0.625	0.618	0.632	0.626	0.62
L2	0.489	0.508	0.517	0.491	0.522	0.515	0.53	0.501	0.506	0.502	0.53
L3	0.471	0.51	0.498	0.469	0.521	0.495	0.516	0.532	0.522	0.52	0.49
L4	0.465	0.475	0.522	0.545	0.515	0.536	0.538	0.57	0.537	0.523	0.51
L5	0.562	0.615	0.649	0.626	0.678	0.702	0.676	0.705	0.674	0.67	0.646
L6	0.523	0.481	0.58	0.584	0.535	0.59	0.555	0.56	0.586	0.548	0.542
L8	0.475	0.478	0.46	0.45	0.525	0.502	0.536	0.546	0.53	0.532	0.54
L9	0.48	0.485	0.526	0.499	0.508	0.517	0.535	0.51	0.551	0.518	
L10	0.405	0.392	0.517	0.51	0.47	0.527	0.46	0.477	0.489	0.408	0.44
L11	0.46	0.475	0.478	0.504	0.511	0.453	0.627	0.502	0.494	0.441	0.395
L12	0.529	0.565	0.55	0.64	0.654	0.5315	0.609	0.66	0.659	0.572	0.56
L13	0.567	0.555	0.612	0.674	0.632	0.59	0.652	0.678	0.665	0.66	0.59
L14	0.482	0.493	0.51	0.544	0.548	0.511	0.55	0.53	0.551	0.534	0.535
Fecha	02-03	03-03	04-04	04-03	05-03	05-05	06-06	06-09	09-03	09-09	10-03
Media	0.495	0.496	0.540	0.548	0.552	0.553	0.562	0.568	0.569	0.543	0.533
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
L1	0.62	0.622	0.615	0.622	0.581	0.595	0.556	0.59	0.584	0.547	
L2	0.53	0.52	0.43	0.452	0.481	0.457	0.4455	0.43975	0.434		
L3	0.49	0.472	0.485	0.493	0.4625	0.432					
L4	0.51	0.492	0.5055	0.519	0.465	0.4455	0.426				
L5	0.646	0.638	0.634	0.631	0.628	0.706	0.677	0.648	0.669		
L6	0.542	0.579	0.593	0.507	0.5835	0.56	0.563	0.5605	0.558		
L8	0.54	0.489	0.515	0.504	0.492	0.501	0.438	0.426	0.424	0.403	
L9											
L10	0.44	0.434	0.412	0.422	0.393	0.365	0.337				
L11	0.395	0.338	0.362	0.33	0.361						
L12	0.56	0.61	0.55	0.673	0.615	0.58	0.517	0.602	0.533	0.517	0.46
L13	0.59	0.529	0.523	0.355	0.519	0.48	0.4805	0.481	0.46		
L14	0.535	0.54	0.521	0.522	0.495	0.512	0.499	0.505			
Fecha	10-03	10-03	11-03	11-03	12-03	12-03	13-03	16-03	16-03	17-03	17-03
Media	0.533	0.522	0.511	0.511	0.506	0.512	0.494	0.532	0.523	0.489	0.460

**ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 10mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0.535	0.551	0.497	0.56	0.581	0.61	0.621	0.619	0.599	0.616	0.618
L2	0.49	0.497	0.488	0.511	0.511	0.512	0.393	0.388	0.52	0.517	0.518
L3	0.497	0.511	0.495	0.5	0.554	0.566	0.574	0.589	0.569	0.555	0.58
L4	0.533	0.524	0.533	0.539	0.494	0.555	0.64	0.599	0.666	0.581	0.577
L5	0.53	0.524	0.52	0.53	0.545	0.56	0.571	0.556	0.534	0.546	0.53
L6	0.59	0.591	0.575	0.589	0.63	0.671	0.671	0.674	0.665	0.67	0.678
L7	0.562	0.564	0.534	0.581	0.594	0.62	0.65	0.6	0.594	0.573	0.536
L8	0.518	0.531	0.524	0.533	0.543	0.534	0.6	0.67	0.68	0.66	0.599
L9	0.454	0.48	0.489	0.49	0.54	0.54	0.546	0.548	0.555	0.557	0.555
L10	0.466	0.465	0.438	0.435	0.425	0.43	0.441	0.442	0.384	0.39	0.397
L11	0.591	0.583	0.583	0.593	0.651	0.66	0.678	0.649	0.647	0.618	0.627
L12	0.495	0.496	0.487	0.528	0.532	0.543	0.534	0.536	0.536	0.539	0.534
L13	0.367	0.38	0.376	0.4	0.419	0.425	0.431	0.416	0.418	0.42	0.421
L14	0.497	0.54	0.47	0.49	0.481	0.46	0.518	0.597	0.591	0.597	0.586
L15	0.532	0.58	0.566	0.57	0.616	0.65	0.651	0.655	0.616	0.623	0.622
Fecha	23-03	23-03	24-03	24-03	25-03	25-03	26-03	26-03	27-03	27-03	30-03
Media	0.510	0.521	0.505	0.523	0.541	0.556	0.568	0.567	0.565	0.564	0.558
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
L1	0.585	0.582	0.62	0.593	0.613	0.616	0.615	0.615	0.66	0.576	0.598
L2	0.511	0.57	0.512	0.516	0.48	0.447	0.466	0.487	0.443	0.444	0.452
L3	0.575	0.557	0.533	0.562	0.553	0.531	0.535	0.533	0.562	0.557	0.415
L4	0.535	0.557	0.6	0.595	0.586	0.584	0.564	0.583	0.595	0.582	0.586
L5	0.553	0.511	0.581	0.491	0.56	0.56	0.673	0.67	0.63	0.645	0.632
L6	0.644	0.625	0.666	0.676	0.671	0.671	0.671	0.671	0.581	0.584	0.65
L7	0.588	0.576	0.625	0.565	0.636	0.619	0.599	0.575	0.596	0.566	0.612
L8	0.599	0.589	0.593	0.575	0.587	0.63	0.599	0.575	0.596	0.566	0.612
L9	0.547	0.515	0.552	0.535	0.56	0.56	0.561	0.562	0.563	0.563	0.574
L10	0.43	0.415	0.466	0.47	0.49	0.485	0.472	0.465	0.459	0.413	0.426
L11	0.639	0.648	0.65	0.638	0.657	0.642	0.625	0.633	0.64	0.651	0.66
L12	0.539										
L13	0.427	0.48	0.417	0.48	0.437	0.435	0.434	0.438	0.429	0.425	0.437
L14	0.577	0.564	0.533	0.57	0.583	0.542	0.542	0.548	0.555	0.481	0.561
L15	0.618	0.642	0.66	0.642	0.65	0.646	0.65	0.639	0.641	0.658	0.668
Fecha	30-03	31-03	31-03	01-04	01-04	02-04	02-04	03-04	03-04	06-04	07-04
Media	0.558	0.559	0.572	0.565	0.576	0.570	0.564	0.561	0.567	0.554	0.559

	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
L1	0.61	0.69	0.61	0.599	0.67	0.617	0.611	0.594	0.62	0.583	0.67
L2	0.459	0.484	0.469	0.465	0.475	0.47	0.463	0.47	0.475	0.471	0.475
L3	0.547	0.576	0.567	0.565	0.569	0.581	0.569	0.576	0.572	0.558	0.568
L4	0.59	0.552	0.562	0.567	0.577	0.578	0.574	0.562	0.577	0.57	0.564
L5											
L6	0.656	0.635	0.64	0.596	0.615	0.665	0.668	0.535	0.644	0.655	0.64
L7	0.615	0.6	0.66	0.524	0.564	0.564	0.564	0.567	0.569	0.57	0.571
L8	0.62	0.595	0.62	0.583	0.6	0.68	0.599				
L9	0.584	0.593	0.127								
L10	0.453	0.458	0.459	0.43	0.43	0.451	0.457	0.435	0.466	0.476	0.48
L11	0.664	0.645	0.63	0.618	0.647	0.625	0.655	0.67	0.68	0.59	0.6
L12											
L13	0.44	0.43	0.442	0.418	0.438	0.44	0.425	0.394	0.425	0.45	0.412
L14	0.551	0.59	0.57	0.565	0.565	0.579	0.572	0.565	0.563	0.573	0.536
L15	0.677	0.66	0.677	0.646	0.646	0.685	0.66	0.668	0.672	0.67	0.665
Fecha	13-04	14-04	14-04	15-04	15-04	16-04	16-04	17-04	20-04	20-04	21-04
Media	0.574	0.578	0.541	0.548	0.566	0.578	0.568	0.549	0.569	0.561	0.562
	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215
L1	0.599	0.595	0.587	0.594	0.599	0.624	0.639	0.554	0.562	0.566	0.568
L2	0.477	0.458	0.455	0.473	0.47	0.462	0.445	0.47	0.447	0.448	0.457
L3	0.544	0.53	0.536	0.527	0.542	0.547	0.547	0.531	0.54	0.544	0.469
L4	0.565	0.55	0.553	0.574	0.549	0.551	0.57	0.568	0.567	0.574	0.576
L5											
L6	0.64	0.644	0.641	0.647	0.66	0.66	0.661	0.619	0.653	0.641	0.63
L7	0.572	0.531	0.565	0.558	0.54	0.546	0.54	0.55	0.556	0.56	0.541
L8											
L9											
L10	0.475	0.458	0.474	0.469	0.479	0.483	0.468	0.446	0.47	0.485	0.448
L11											
L12											
L13	0.42	0.393	0.396	0.41	0.47	0.415	0.43	0.415	0.42	0.44	0.371
L14	0.55	0.536	0.536	0.53	0.517	0.532	0.539	0.547	0.523	0.525	0.545
L15	0.655	0.645	0.648	0.646	0.638	0.632	0.43	0.641	0.63	0.618	0.612
Fecha	21-04	22-04	22-04	23-04	23-04	24-04	24-04	27-04	27-04	28-04	28-04
Media	0.550	0.534	0.539	0.543	0.546	0.545	0.527	0.534	0.537	0.540	0.522

	220	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275
L1	0,569	0,57	0,568	0,69								
L2	0,44	0,442	0,438	0,435	0,445	0,425	0,428	0,427	0,425	0,432	0,427	0,424
L3	0,49											
L4	0,56	0,543	0,544	0,545								
L5												
L6												
L7	0,532	0,527	0,522									
L8												
L9												
L10	0,452	0,425	0,47	0,41	0,43	0,385	0,414	0,393	0,44	0,41	0,423	0,417
L11												
L12												
L13	0,332	0,351	0,363	0,374								
L14	0,532	0,5										
L15	0,65	0,615	0,57	0,62	0,63							
Fecha	29-04	29-04	30-04	30-04	04-05	04-05	05-05	05-05	06-05	06-05	07-05	07-05
Media	0,506	0,497	0,496	0,512	0,502	0,495	0,421	0,410	0,433	0,421	0,425	0,421



**ENSAYO 120 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0.573	0.51	0.529	0.601	0.577	0.597	0.585	0.615	0.59	0.625	0.59
L2	0.576	0.578	0.574	0.605	0.561	0.666	0.668	0.67	0.663	0.702	0.69
L3	0.476	0.49	0.501	0.508	0.547	0.545	0.558	0.545	0.55	0.572	0.561
L4	0.52	0.539	0.542	0.583	0.596	0.598	0.6	0.615	0.608	0.624	0.618
L5	0.542	0.533	0.53	0.568	0.572	0.612	0.604	0.582	0.593	0.637	0.629
L6	0.605	0.619	0.622	0.627	0.683	0.691	0.655	0.679	0.681	0.693	0.697
L7	0.563	0.574	0.584	0.642	0.653	0.657	0.645	0.665	0.646	0.691	0.68
L8	0.524	0.539	0.55	0.583	0.6	0.624	0.606	0.623	0.605	0.639	0.644
L9	0.527	0.547	0.542	0.613	0.614	0.619	0.619	0.616	0.612	0.623	0.623
L10	0.485	0.516	0.519	0.532	0.583	0.581	0.573	0.597	0.541	0.566	0.576
L11	0.448	0.459	0.479	0.525	0.553	0.557	0.539	0.552	0.582	0.56	0.553
L12	0.445	0.448	0.469	0.512	0.499	0.507	0.507	0.494	0.517	0.528	0.523
L13	0.522	0.523	0.539	0.584	0.599	0.612	0.598	0.611	0.603	0.612	0.622
L14	0.476	0.484	0.48	0.382	0.537	0.564	0.525	0.544	0.503	0.57	0.524
L15	0.446	0.542	0.542	0.574	0.578	0.613	0.628	0.646	0.644	0.673	0.649
Fecha	07-05	08-05	08-05	11-05	11-05	12-05	12-05	13-05	18-05	19-05	19-05
Media	0.515	0.527	0.533	0.563	0.590	0.603	0.594	0.604	0.596	0.621	0.612

	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
L1	0.615	0.528	0.612	0.582	0.589	0.565	0.626	0.592	0.626	0.618	0.637
L2	0.672	0.698	0.683	0.7	0.648	0.69	0.725	0.71	0.73	0.712	0.734
L3	0.576	0.562	0.575	0.569	0.577	0.557	0.583	0.584	0.544	0.581	0.586
L4	0.624	0.625	0.629	0.612	0.601	0.589	0.629	0.622	0.631	0.606	0.624
L5	0.63	0.63	0.64	0.645	0.603	0.582	0.609	0.609	0.613	0.594	0.578
L6	0.719	0.703	0.71	0.714	0.728	0.705	0.733	0.72	0.737	0.72	0.745
L7	0.683	0.675	0.701	0.677	0.66	0.647	0.645	0.584	0.586	0.58	0.584
L8	0.643	0.639	0.645	0.641	0.648	0.626	0.651	0.66	0.675	0.658	0.649
L9	0.677	0.406	0.452	0.403	0.407	0.386	0.426	0.416	0.406	0.398	0.391
L10	0.567	0.579	0.617	0.582	0.557	0.581	0.567	0.561	0.506	0.489	0.385
L11	0.594	0.58	0.593	0.586	0.602	0.591	0.604	0.613	0.601	0.609	0.617
L12	0.505	0.515	0.477	0.504	0.488	0.47	0.484	0.498	0.494	0.481	0.505
L13	0.639	0.625	0.648	0.627	0.631	0.605	0.628	0.642	0.65	0.627	0.664
L14	0.573	0.514	0.583	0.52	0.558	0.544	0.556	0.572	0.589	0.546	0.58
L15	0.669	0.654	0.669	0.663	0.661	0.641	0.68	0.673	0.677	0.666	0.676
Fecha	20-05	20-05	21-05	21-05	22-05	22-05	25-05	25-05	26-05	26-05	27-05
Media	0.626	0.596	0.616	0.602	0.597	0.585	0.610	0.604	0.604	0.592	0.597

	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
L1											
L2	0.714	0.723	0.704	0.68	0.689	0.73	0.717	0.673	0.626	0.596	0.56
L3	0.589	0.609	0.588	0.593	0.603	0.598	0.562	0.579	0.574	0.588	0.565
L4	0.623	0.624	0.62	0.612	0.616	0.609	0.599	0.605	0.611	0.604	0.608
L5	0.588	0.566	0.567	0.589	0.568	0.57	0.543	0.529	0.511	0.502	0.519
L6	0.749	0.762	0.735	0.742	0.734	0.774	0.736	0.753	0.768	0.776	0.778
L7	0.562	0.571	0.543	0.513	0.52	0.557	0.501	0.485	0.468	0.435	
L8	0.652	0.661	0.642	0.644	0.64	0.647	0.654	0.646	0.639	0.639	0.634
L9	0.306	0.3	0.298	0.296	0.294	0.321					
L10	0.375	0.389	0.34	0.328	0.32	0.322	0.282	0.273	0.263	0.254	0.201
L11	0.602	0.578	0.532	0.515	0.487	0.483	0.454	0.438	0.422	0.433	0.407
L12	0.457	0.442	0.482	0.444	0.446	0.478	0.464	0.465	0.448	0.396	0.336
L13	0.62	0.602	0.548	0.551	0.524	0.582	0.526	0.519	0.511	0.507	0.481
L14	0.561	0.574	0.555	0.564	0.534	0.56	0.52	0.516	0.512	0.494	0.432
L15	0.68	0.681	0.656	0.676	0.677	0.685	0.668	0.662	0.657	0.635	0.651
Fecha	27-05	28-05	28-05	29-05	29-05	01-06	01-06	02-06	02-06	03-06	03-06
Media	0.577	0.577	0.558	0.553	0.546	0.565	0.557	0.549	0.539	0.528	0.514
L1											
L2	0.56	0.512	0.519	0.51							
L3	0.558	0.556	0.631	0.562	0.497	0.474	0.493	0.493	0.5	0.492	
L4	0.626	0.624	0.626	0.004	0.023		0.058			0.553	
L5											
L6	0.783	0.78									
L7											
L8	0.644	0.643	0.655	0.642	0.657	0.63	0.562	0.561	0.503		
L9											
L10	0.175	0.132									
L11	0.433	0.337									
L12											
L13	0.5	0.457	0.476	0.442							
L14	0.453	0.42									
L15	0.683	0.667	0.665	0.638	0.64						
Fecha	04-06	04-06	05-06	05-06	08-06	09-06	09-06	10-06	10-06	15-06	16-06
Media	0.542	0.513	0.579	0.466	0.454	0.552	0.371	0.527	0.502	0.523	

	220	225	230	235	240
L1					
L2					
L3	0.487				
L4	0.53				
L5					
L6					0.668
L7					
L8					
L9					
L10					
L11					
L12					
L13					
L14					
L15					
Fecha	16-06	17-06	17-06	18-06	18-06
Media	0.509				0.568

ENSAYO 140 °C Y 70% HUMEDAD RELATIVA A 30mA

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0,413	0,444	0,46	0,472	0,471	0,46	0,443	0,44	0,429	0,000396	
L2	0,485	0,525	0,534	0,559	0,563	0,544	0,535	0,532	0,528	0,533	0,529
L3	0,56	0,554	0,577	0,576	0,572	0,531	0,555	0,558			
L4	0,553	0,598	0,61	0,594	0,586	0,564	0,528	0,483			
L5	0,457	0,504	0,525	0,542	0,553	0,554	0,424	0,371	0,348	0,332	0,314
L6	0,456	0,535									
L7	0,44	0,476	0,469	0,491	0,503	0,484	0,445	0,424	0,413	0,407	
L8	0,511	0,568									
L9	0,442	0,504	0,514	0,533	0,508	0,539	0,537	0,458	0,434	0,45	0,441
L10	0,46	0,6	0,616	0,626	0,64	0,591	0,554	0,542	0,5	0,47	0,441
L11	0,433	0,491	0,484	0,505	0,517	0,492	0,488	0,479	0,456	0,457	0,402
L12	0,561	0,555	0,576	0,582	0,603	0,548	0,546	0,517			
L13	0,543	0,588	0,592	0,58	0,566	0,487	0,451	0,445	0,427	0,422	0,00081
L14	0,476	0,524	0,527	0,556	0,558	0,568	0,549	0,54	0,539	0,527	0,521
L15	0,428	0,459	0,476	0,502	0,502	0,488	0,481	0,472	0,49	0,491	0,504
Fecha	18-06	19-06	22-06	22-06	23-06	23-06	24-06	25-06	25-06	26-06	26-06
Media	0,481	0,529	0,535	0,548	0,549	0,527	0,503	0,482	0,456	0,409	0,394

	55	60	65	70	75	80
L1						
L2	0,539	0,54				
L3						
L4		0,487				
L5	0,26	0,268	0,254	0,263		
L6						
L7	0,388					
L8	0,245	0,227	0,196	0,21	0,152	0,142
L9	0,449					
L10						
L11	0,393					
L12						
L13						
L14	0,518	0,516	0,493			
L15						
Fecha	29-06	29-06	30-06	30-06	01-06	01-06
Media	0,399	0,412	0,314	0,237	0,152	0,142



**ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 30mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0.482	0.441	0.455	0.464	0.434	0.173					
L2	0.517	0.537	0.574	0.553	0.545	0.55					
L3	0.524	0.566	0.586	0.572	0.559	0.5185	0.478	0.365			
L4	0.472	0.523	0.539	0.492	0.461	0.475	0.428	0.286	0.341	0.281	
L5	0.476	0.535	0.536	0.534	0.494	0.512	0.323	0.006	0.22	0.222	
L6	0.508	0.549	0.55	0.5	0.488	0.409	0.33	0.576			
L7	0.603	0.647	0.66	0.666	0.575	0.641	0.67				0.249
L8	0.607	0.623	0.2	0.601	0.569	0.507	0.365				
L9	0.477	0.4545	0.432	0.417	0.474	0.5025	0.531				
L10	0.503	0.488	0.518	0.482	0.4505	0.43475	0.419				
L11	0.76	0.516	0.515	0.511	0.458	0.428	0.3955	0.363	0.295	0.007	0.108
L12	0.502	0.487	0.467	0.448							
L13	0.566	0.576	0.599	0.578	0.557	0.494	0.468				
L14	0.515	0.601	0.561	0.557	0.553						
L15	0.56	0.539	0.566	0.531				0.362			
Fecha	30-nov	01-dic	02-dic	03-dic	04-dic	07-dic	08-dic	09-dic	10-dic	11-dic	14-dic
Media	0.537	0.539	0.517	0.527	0.517	0.470	0.441	0.326	0.285	0.170	0.179

**ENSAYO 140 °C Y 60% HUMEDAD RELATIVA A 30mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L1	0.543	0.555	0.595	0.606	0.624	0.585	0.592	0.586	0.566	0.607	0.582
L2	0.468	0.525	0.531	0.538	0.536	0.524	0.528	0.525	0.532	0.527	0.504
L3	0.601	0.69	0.696	0.714	0.722	0.694	0.665	0.649	0.654	0.659	0.637
L4	0.516	0.533	0.582	0.575	0.604	0.596	0.573	0.587	0.571	0.575	0.568
L5	0.434	0.481	0.485	0.505	0.508	0.496	0.501	0.482	0.473	0.472	0.457
L6	0.424	0.468	0.523	0.536	0.534	0.517	0.504	0.519	0.534		
L7	0.462	0.486	0.513	0.525	0.532	0.531	0.523	0.524	0.524	0.525	0.552
L8	0.559	0.615	0.65	0.63	0.616	0.585	0.604	0.615	0.566	0.607	0.546
L9	0.433	0.448	0.489	0.465	0.456	0.376	0.399	0.405	0.304	0.356	0.247
L10	0.427	0.474	0.49	0.5	0.505	0.504	0.465	0.466	0.446	0.463	0.448
L11	0.51	0.529	0.56	0.551	0.575	0.516	0.522	0.518	0.474	0.503	0.458
L12	0.434	0.448	0.492	0.503	0.506	0.498	0.46	0.456	0.454	0.458	0.432
L13	0.47	0.482	0.51	0.52	0.521	0.501	0.503	0.515	0.507	0.511	0.509
L14	0.441	0.463	0.485	0.479	0.457	0.424	0.114				
L15	0.435	0.47	0.491	0.504	0.504	0.49	0.466	0.475	0.477	0.498	0.449
Fecha	12-ene	13-ene	14-ene	15-ene	18-ene	19-ene	20-ene	21-ene	22-ene	25-ene	26-ene
Media	0.477	0.511	0.539	0.543	0.547	0.522	0.495	0.523	0.506	0.520	0.491

	55	60	65	70	75	80	85
L1	0.53	0.528					
L2	0.488	0.454	0.471	0.472	0.406	0.373	0.174
L3	0.591	0.572	0.554	0.436	0.37	0.316	
L4	0.561	0.56	0.521	0.512			
L5	0.443						
L6							
L7	0.55						
L8	0.508	0.5115	0.515	0.527			
L9							
L10	0.41	0.337	0.383				
L11	0.465	0.462					
L12	0.414	0.432	0.428				
L13	0.53						
L14							
L15	0.488	0.476					
Fecha	27-ene	28-ene	29-ene	01-feb	02-feb	03-feb	04-feb
Media	0.498	0.482	0.479	0.487	0.388	0.345	0.174

**ENSAYO 140 °C Y 85% HUMEDAD RELATIVA A 20mA**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
L1	0.467	0.528	0.528	0.523	0.508	0.501	0.478	0.466	0.464	0.477	0.407	
L2	0.522	0.569	0.584	0.572	0.564	0.569	0.56	0.561	0.569			
L3	0.474	0.53	0.533	0.532	0.506	0.509	0.47	0.45	0.458	0.436	0.402	
L4	0.466	0.504	0.535	0.523	0.52	0.522	0.515	0.508	0.519	0.505	0.428	0.376
L5	0.53	0.589	0.621	0.611	0.612	0.6	0.56	0.547	0.557	0.526		
L6	0.511	0.573	0.56	0.548	0.548	0.544	0.527	0.515	0.514	0.476		
L7	0.482	0.508	0.515	0.517	0.472	0.469	0.4695	0.47				
L8	0.535	0.596	0.578	0.584	0.552	0.548	0.562	0.564	0.56	0.556		
L9	0.554	0.587	0.63	0.592	0.605	0.606	0.601	0.595	0.623	0.584		
L10	0.572	0.625	0.626	0.612	0.612	0.609	0.612	0.602	0.607	0.595	0.542	
L11	0.51	0.544	0.56	0.539	0.513	0.518	0.504	0.495	0.486	0.446		
L12	0.482	0.52	0.518	0.516	0.504	0.488	0.495	0.48	0.478	0.447	0.416	
L13	0.496	0.524	0.544	0.528	0.536	0.527	0.52	0.493	0.476	0.474	0.48	0.443
L14	0.477	0.527	0.508	0.514	0.52	0.514	0.47	0.432	0.404	0.372	0.336	0.284
L15	0.516	0.563	0.567	0.568	0.557	0.541	0.553	0.501	0.504	0.492	0.49	
Fecha	10-feb	11-feb	12-feb	13-feb	16-feb	17-feb	18-feb	19-feb	22-feb	23-feb	24-feb	25-feb
Media	0.506	0.552	0.560	0.552	0.542	0.538	0.526	0.512	0.516	0.491	0.438	0.368